

TREBALL DE FI DE GRAU

Grau en Enginyeria Mecànica

**ESTUDI DE PROPIETATS MECÀNIQUES DE PECES
FABRICADES PER IMPRESSIÓ 3D**



Memòria i Annexos

Autor: Bàrbara Adrover Monserrat
Director: José Antonio Travieso Rodríguez
Convocatòria: Juny 2018

RESUM

L'objectiu d'aquest projecte és l'estudi de la influència dels paràmetres de fabricació sobre l'estudi mecànic d'esforços a fatiga per a mostres impreses a partir de la tècnica FDM (*Fused Deposition Material*), també anomenada FFF (*Fused Filament Fabrication*) amb el material *Timberfill*. S'estudiarà la influència de la velocitat d'impressió, la densitat d'emplenament, diàmetre de l'extrusor i l'alçada de capa. Totes les mostres estudiades tindran un emplenament de *Honeycomb* i estaran impreses respecte l'eix X. Les mesures de les provetes estan basades amb la normativa ASTM, específicament, per la norma ASTM D7774. Una vegada es tenen totes les mostres fabricades segons els paràmetres anomenats, s'exposen aquestes mostres a l'esforç a fatiga fins que rompin a fi d'avaluar els resultats. Per a fer aquest estudi òptim, s'utilitza l'estadística de Taguchi per a reduir el nombre de mostres impreses i assajades. Per a obtenir els resultats i la influència dels factors, s'utilitzarà ANOVA (*Analysis of Variance*). Al final de l'estudi es conclourà quina és la combinació de paràmetres variats més efectiva a fi de trobar la vida òptima de les mostres a partir de la corba de Wöhler. D'aquesta manera s'hauran estudiat les propietats mecàniques del *Timberfill* sotmès a fatiga.

Paraules clau. Fused Deposition Material, Timberfill, Fatiga.

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo el estudio de la influencia de los parámetros de fabricación sobre el estudio mecánico de esfuerzos a fatiga para muestras impresas utilizando la técnica FDM (*Fused Deposition Material*), que también se conoce como FFF (*Fused Filament Fabrication*) con el material *Timberfill*. Se va a estudiar la influencia de la velocidad de impresión, la densidad de relleno, el diámetro de la boquilla y la altura de capa. Todas las muestras estudiadas tienen un relleno Honeycomb y están impresas respecto al eje X. Las medidas de las muestras siguen la normativa ASTM, en concreto la norma ASTM D7774. Una vez estén todas las muestras impresas teniendo en cuenta los parámetros anteriores, se someten a esfuerzo a fatiga hasta la rotura de las piezas para poder evaluar la vida de éstas. Para que el proceso sea óptimo, se utiliza la estadística de Taguchi para reducir el número de piezas imprimidas y ensayadas. Se va a utilizar ANOVA (*Analysis of Variance*) para obtener los resultados y la influencia de los factores. Por último, se concluirá cual es la combinación de parámetros más efectiva para poder encontrar la vida óptima de las muestras a partir de la curva de Wöhler. Al final del estudio se habrán estudiado las propiedades mecánicas del *Timberfill* sometido a fatiga.

Palabras clave. Fused Deposition Material, Timberfill, Fatiga.



ABSTRACT

This thesis aims to study the influence of manufacturing parameters of specimens built through FDM (Fused Deposition Material), also known as FFF (Fused Filament Fabrication), with Timberfill as the material tested by fatigue. This project is going to analyse the effect of the layer height, nozzle diameter, printing velocity and fill density on the fatigue performance of cylindrical specimens. All the samples will be printed with infill Honeycomb and oriented on the axis X. The design of shape and geometry of the samples is based on ASTM Standard, specifically ASTM D7774. To avoid making a large number of specimens and tests, statistics of Taguchi are applied. For analysing the influence of the factors, ANOVA (Analysis of Variance) is performed. At the end, this thesis will determine the most effective combination of parameters that can obtain the best mechanical properties of parts built from Timberfill material tested with fatigue, in order to represent the Wöhler curve.

Keywords. Fused Deposition Material, Timberfill, Fatigue.



<i>Resum</i>	2
<i>Resumen</i>	3
<i>Abstract</i>	4
INTRODUCCIÓ	6
<i>Objectius</i>	6
<i>Motivació</i>	7
1. ESTAT DE L'ART	8
1.1 <i>Mètodes d'Additive Manufacturing</i>	9
1.2 <i>Comportament mecànic de peces de AM</i>	10
1.3 <i>Comportament mecànic FDM</i>	20
1.4 <i>Timberfill</i>	22
2. DESCRIPCIÓ DELS EXPERIMENTS	24
2.1 <i>Provetes</i>	24
2.2 <i>Màquines i aparells utilitzats</i>	25
2.3 <i>Disseny d'experiments Taguchi</i>	31
2.4 <i>Execució experimental</i>	33
3. RESULTATS DELS EXPERIMENTS	37
3.1 <i>Resistència a la fatiga</i>	37
3.2 <i>Quantitat de material utilitzat</i>	54
3.3 <i>Cost de producció i execució</i>	60
3.4 <i>Temperatura de ruptura</i>	63
3.5 <i>Anàlisi de la vida a fatiga en condicions òptimes</i>	67
4. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS	71
4.1 <i>Resistència a la fatiga</i>	71
4.2 <i>Quantitat de material utilitzat</i>	73
4.3 <i>Cost de producció i execució</i>	74
4.4 <i>Temperatura de ruptura</i>	75
4.5 <i>Comparació del PLA amb Timberfill</i>	76
5. CONCLUSIONS	80
6. BIBLIOGRAFIA	82
6.1 <i>Referències bibliogràfiques</i>	82
6.2 <i>Bibliografia de consulta</i>	84

INTRODUCCIÓ

OBJECTIUS

Aquest projecte té com a objectiu principal, estudiar les propietats mecàniques que presenta un material nou, com és el *Timberfill*, una vegada s'ha imprès amb impressores 3D seguint la tècnica d'*Additive Manufacturing*. Per a fer l'estudi es segueix la metodologia aplicada a estudis anteriors [16].

Aquesta metodologia està dividida en 3 etapes:

1. Impressió de les mostres que es volen estudiar variant els valors d'alçada de capa, densitat d'emplenament, diàmetre de l'extrusor i velocitat d'impressió.
2. Assajos a fatiga fins que les provetes rompin, estudiant així el nombre de cicles de vida de cada proveta i la temperatura de ruptura, fins a trobar la mostra amb la vida més llarga.
3. Discussió de resultats obtinguts a fatiga.

Una de les conclusions serà assenyalar quina combinació de paràmetres és la millor per a obtenir les propietats mecàniques més altes i mostrar la influència dels paràmetres d'impressió sobre la ruptura de la millor combinació. Aquest estudi es farà a partir de la estadística de Taguchi.

També es pretén analitzar la vida de la millor mostra, trobant així la vida òptima. Això s'aconseguirà dibuixant la corba de Wöhler específica per el material.

Per acabar, l'últim objectiu del projecte és comparar els resultats obtinguts del compost *Timberfill* amb els resultats obtinguts al polímer PLA (*Polylactic acid*) per trobar una relació entre sí.

MOTIVACIÓ

La impressió 3D és una tecnologia que de cada vegada és més utilitzada tant per grans indústries com per ús particular. Per tant, aquesta tècnica requereix nous coneixements que inclouen àmbits molt diversos. Un d'aquests àmbits és el d'Enginyeria Mecànica ja que molts prototips i fins i tot peces finals s'obtenen a partir de la impressió 3D. A més, un avantatge que presenta aquesta tècnica és que es pot obtenir una idea físicament en el moment que es necessiti.

La impressió 3D dins de l'àmbit d'Enginyeria Mecànica uneix dues branques diferents d'enginyeria: la fabricació i l'estudi de propietats mecàniques. Això implica l'estudi dels paràmetres d'impressió aplicant després els coneixements de les prestacions mecàniques dels diferents materials utilitzats.

El fet de que s'apliqui la tècnica d'impressió 3D de cada vegada més, fa que l'interès en estudiar nous materials també sigui de cada vegada major. El *Timberfill* és un nou material objectiu d'estudi ja que és un material biodegradable amb propietats similars a les del PLA que a més presenta un acabat similar a fusta. Això permet fer mostres amb aspecte a fusta però amb detalls complexos.

A més, també hi ha l'ambició de comparar el *Timberfill*, que és un material compost per PLA i fibres de fusta, amb el propi polímer PLA. Observant les diferències entre els dos a fi d'arribar a conclusions mostrant si les fibres afecten molt des d'un punt de vista mecànic al nou material.

Tots aquests motius són els que fan interessant l'estudi de propietats mecàniques dels materials, que és de cada vegada més necessari amb la finalitat de satisfer les necessitats de la indústria d'avui en dia.

1. ESTAT DE L'ART

La impressió 3D es defineix com un procés de fabricació d'objectes. Aquest procés es basa en la superposició de capes successives de material aconseguint així l'exemplar final. A fi de processar aquesta informació a la impressora, s'utilitza un sistema informàtic per controlar els moviments que farà la màquina impressora en un sistema de coordenades X, Y i Z [13]. Les impressores 3D s'estan utilitzant de cada vegada més, ja que les aplicacions d'aquesta s'han multiplicat exponencialment. És degut a aquest creixement que la impressió 3D és la base d'una nova revolució industrial [12].

Aquesta tecnologia va aparèixer en els anys 80 i va guanyar importància durant la dècada dels 1990 encara que només s'utilitzava en l'àmbit d'enginyeria, arquitectura i disseny industrial. Al llarg del temps, així com s'ha augmentat l'ús d'aquesta tècnica, s'han anat adoptant diferents formes d'anomenar la impressió 3D. Els noms més comuns són *Additive Manufacturing*, fabricació additiva o *Rapid Prototyping*.

La fabricació additiva segueix creixent, i avui en dia els objectes fabricats a partir de la impressió 3D poden ser prototips a la indústria aeronàutica, o fins i tot, productes finals per aquesta indústria. També s'utilitza en l'àmbit de la medicina ja que es pot imprimir en escala nanomètrica fent ús de cèl·lules vives. I de cada vegada més, les peces resultants es fan servir en àmbits mecànics [12]. És per això que és necessari saber com es comporta un material determinat amb uns paràmetres d'impressió determinats sotmès a un cert esforç com per exemple assaig a tracció o fatiga. Els exemplars utilitzats en l'àmbit d'enginyeria mecànica, de manera molt freqüent poden estar sotmesos a fatiga, i aquest serà l'esforç estudiat en aquest projecte.

La fatiga s'entén com a la repetició d'aplicació de càrrega sobre un objecte o una estructura. El resultat d'aquestes tensions aplicades provoca micro deformacions plàstiques al material implicat. Aquestes deformacions es van acumulant fins que s'arriba a la tensió límit del material, es provoca una esquerda i el material falla, és a dir, romp. Es diferencien dos tipus de fatiga depenent de si l'aplicació de càrrega és en forma de cicles de rotació o no [11].

El procés de ruptura a través de la fatiga es pot dividir en tres etapes bàsiques: inici de l'esquerda, progressió i ruptura fràgil. La primera és l'inici de l'esquerda. L'esquerda

normalment es forma a la superfície de la peça, és per això que l'acabat de la peça en que es treballarà és molt important ja que d'aquest acabat depèn la presència de fatiga. La ruptura és la conseqüència de la concentració de tensions trobada a la superfície de la peça. Aquesta concentració de tensions pot estar produïda per un defecte o una irregularitat de l'acabat de la peça. La segona etapa és la progressió de l'esquerda. En aquesta etapa s'observa el creixement de l'esquerda, es tracta d'una propagació més lenta, depenent del cicle fins que arriba a una mida crítica i després, a l'última etapa, la peça romp de manera ràpida. I l'última etapa és la ruptura de la peça. Quan es parla de fatiga, es parla d'una ruptura fràgil, per tant, la peça romprà de manera ràpida i sense un avís previ [14].

1.1 MÈTODES D'ADDITIVE MANUFACTURING

La fabricació additiva està creixent de manera molt elevada i s'espera un progrés important al llarg dels següents anys [10].

Aquesta fabricació representa un procés que és la impressió 3D de molts de plàstics i metalls. L'*Additive Manufacturing* (AM) és una impressió que es fa capa a capa i es pot diferenciar en diferents categories. És una tècnica de producció ràpida, on no es necessiten motlles o accessoris addicionals encara que normalment, les propietats mecàniques tendeixen a ser reduïdes. Aquests processos requereixen un treball previ. El treball previ de manera sovint és denominat Fabricació Digital, ja que és necessari fer un disseny en 3D de la peça que es voldrà obtenir com a resultat. Aquest disseny s'aconsegueix amb programes de *Computer-Aided Design (CAD) software*. Quan es disposa del disseny final, digitalment es separa aquesta peça en capes i després a partir d'un codi es pot executar amb la impressora 3D que fabricarà la peça desitjada [18, 22].

Els processos d'impressió 3D es poden diferenciar i dividir en diferents tipus. Usualment es divideixen segons dos criteris: segons l'estat inicial del material d'entrada o bé segons el mecanisme d'impressió.

Si s'estudia el primer cas, s'ha de tenir en compte que el material es pot trobar en estat líquid, en estat sòlid o en forma de pols. D'aquesta manera, es tractarà de forma diferent cada material.

L'altre divisió freqüent de les diferents tècniques d'impressió 3D es basa amb diverses propietats d'impressió. La societat ASTM ha creat uns estàndards a fi de classificar el diferents

processos d'*Additive Manufacturing* segons aquest criteri. Aquesta societat ho divideix en set processos diferents. Els processos són els següents: *Material Extrusion*, *Material Jetting*, *Vat Photopolimerization*, *Binder Jetting*, *Sheet Lamination*, *Power Bed Fusion* i, per últim, *Directed Energy Deposition* [22].

Uns dels processos més comuns per a polímers i el que s'utilitzarà en aquest projecte és el de *Material Extrusion*. Dins d'aquest procés s'hi inclou l'anomenat *Fused Deposition Material* (FDM) o bé *Fused Filaments Foundation* (FFF). Aquest tipus d'*Additive Manufacturing* serà el que s'estudiarà amb més profunditat a l'apartat 1.3.

1.2 COMPORTAMENT MECÀNIC DE PECES DE AM

El comportament que tindran les mostres impreses a partir del mètode d'*Additive Manufacturing* depèn del material que s'imprimeix, del tipus d'impressió i dels paràmetres definits a l'hora d'imprimir.

Utilitzant el material *Timberfill* i FDM com a mètode de fabricació, només queda definir els paràmetres d'impressió segons el que interessi per l'estudi.

Estudiar les propietats mecàniques d'una proveta impresa en 3D podria ser una tasca molt llarga per la quantitat de paràmetres influents tant a la impressió com a la fatiga. És per això que per optimitzar el procés i fer-ho més lleuger però amb la mateixa fiabilitat, es consideren només els quatre paràmetres més influents segons els resultats d'estudis previs sobre la fatiga [7]. Aquests paràmetres són l'alçada de capa, el diàmetre de l'extrusor, la densitat d'emplenament i la velocitat d'impressió. En quant a l'emplenament es considerarà la densitat variable i el patró constant. El programa utilitzat per a definir els paràmetres és *Simplify3D*.

❖ Diàmetre de l'extrusor

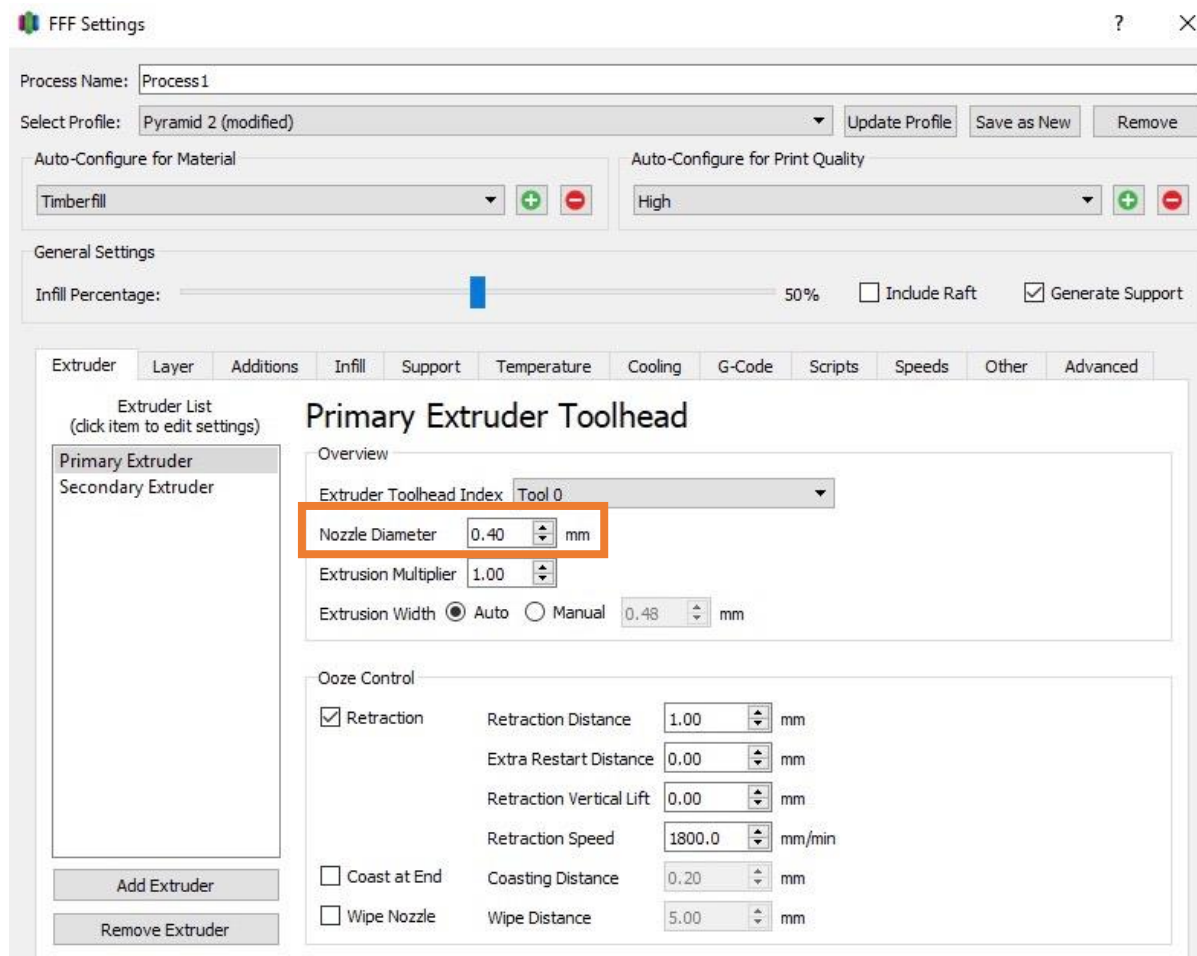


Figura 1. Paràmetres relacionats amb l'extrusor.

Aquest model d'impressora disposa de dos extrusors. En el nostre cas només n'utilitzarem un ja que només imprimim amb un sol material. Per aquest motiu, per definir els paràmetres d'aquest projecte, sempre es seleccionarà l'extrusor primari.

El paràmetre que es variarà per l'extrusor és el diàmetre. Es definiran els valors del diàmetre a partir de la fitxa tècnica del material.

La fitxa tècnica informa a l'usuari que ha de ser un diàmetre de 0.4mm o més gran. Però experimentalment s'ha pogut observar que un diàmetre 0.4mm és massa petit. Per poder arribar en aquesta conclusió s'ha provat d'imprimir el material amb 0.4mm de diàmetre amb dos

models d'impressores 3D i s'ha arribat a la conclusió que no és factible imprimir una mostra amb aquest diàmetre.

Per aquest motiu, en aquest projecte s'utilitzaran els valors de (0.5, 0.6, 0.7) mm de diàmetre.

❖ Alçada de capa

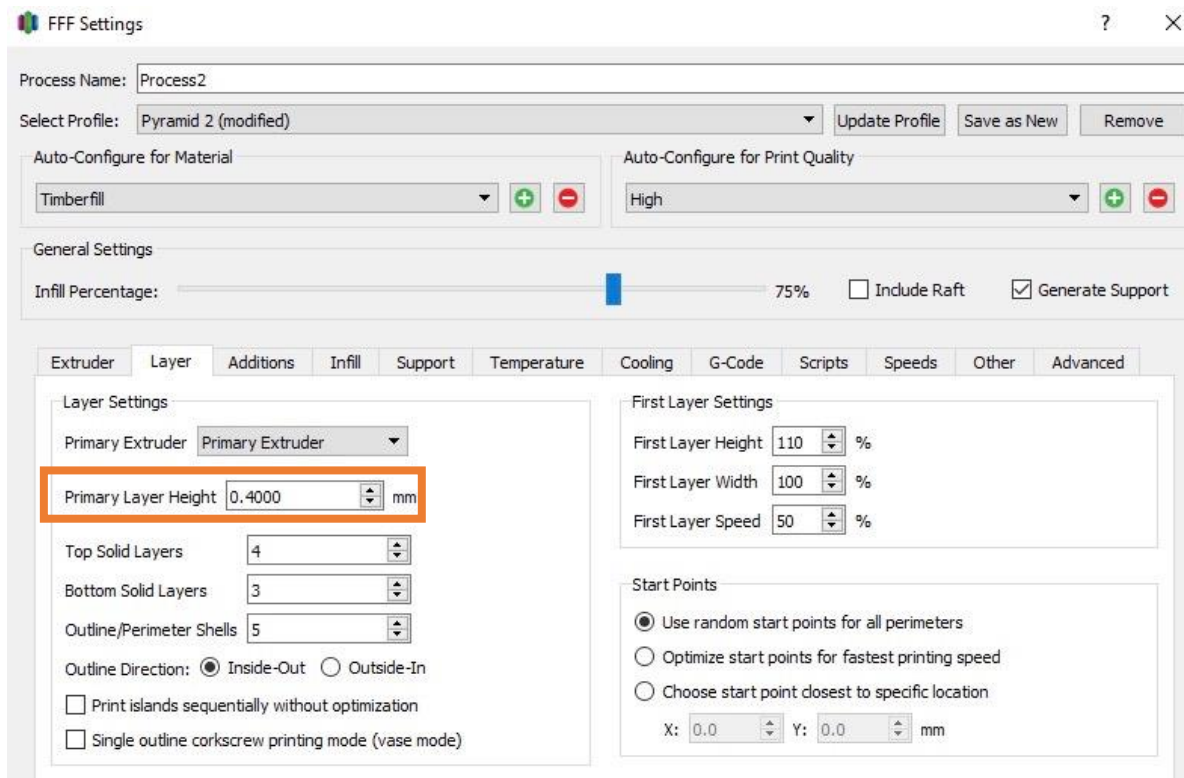


Figura 2. Paràmetres relacionats amb l'alçada de capa.

L'alçada de capa s'ajustarà als valors de (0.2, 0.3, 0.4) mm ja que aquest paràmetre té una correlació amb el diàmetre d'extrusió. Per tant, com més gran és el valor del diàmetre de l'extrusor, més gran serà el valor de l'alçada de capa. Es selecciona també com a perfil d'impressora *Pyramid 2* ja que és amb la que s'imprimirà.

❖ Emplenament

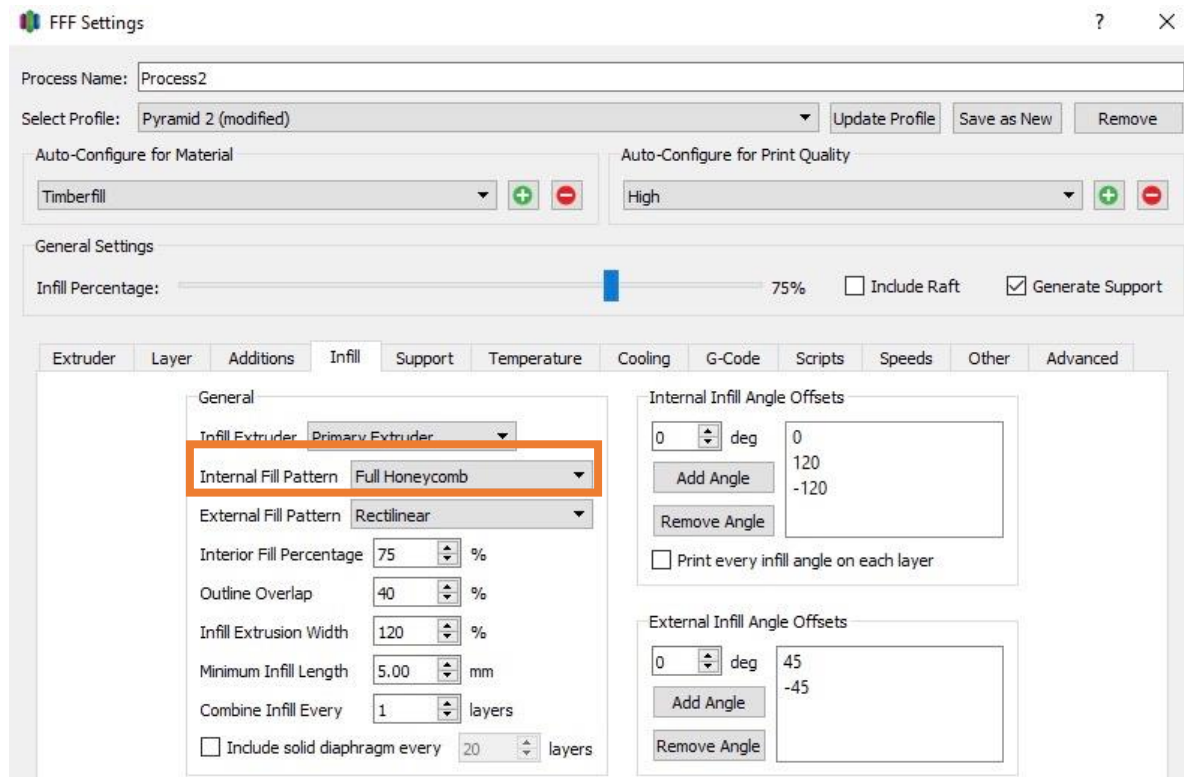


Figura 3. Paràmetres relacionats amb l'emplenament.

Dins de l'emplenament hi ha dos factors diferents: el patró d'emplenament i la densitat d'emplenament.

Patró d'emplenament

Les peces fabricades per FDM estan formades per dos tipus de patrons d'emplenament diferents. Tenen un patró d'emplenament interior i un exterior. Els dos defineixen les propietats mecàniques de les mostres. En aquest projecte, un dels factors determinants és el patró interior, per aquest motiu, el patró exterior es deixarà com està predeterminat al programa utilitzat. Aquest serà un patró rectilini i el nombre de capes serà cinc, com es pot observar a la figura 5. En canvi, es decidirà quin patró interior serà estudiat però una vegada triat, es mantindrà durant tot el projecte.

El programa *Simplify3D* ofereix diversos tipus d'emplenament interior per les peces. Es poden trobar sis emplenaments diferents dels quals se n'escollirà un per imprimir les mostres. Els que presenta el programa són els mostrats a la figura 4.

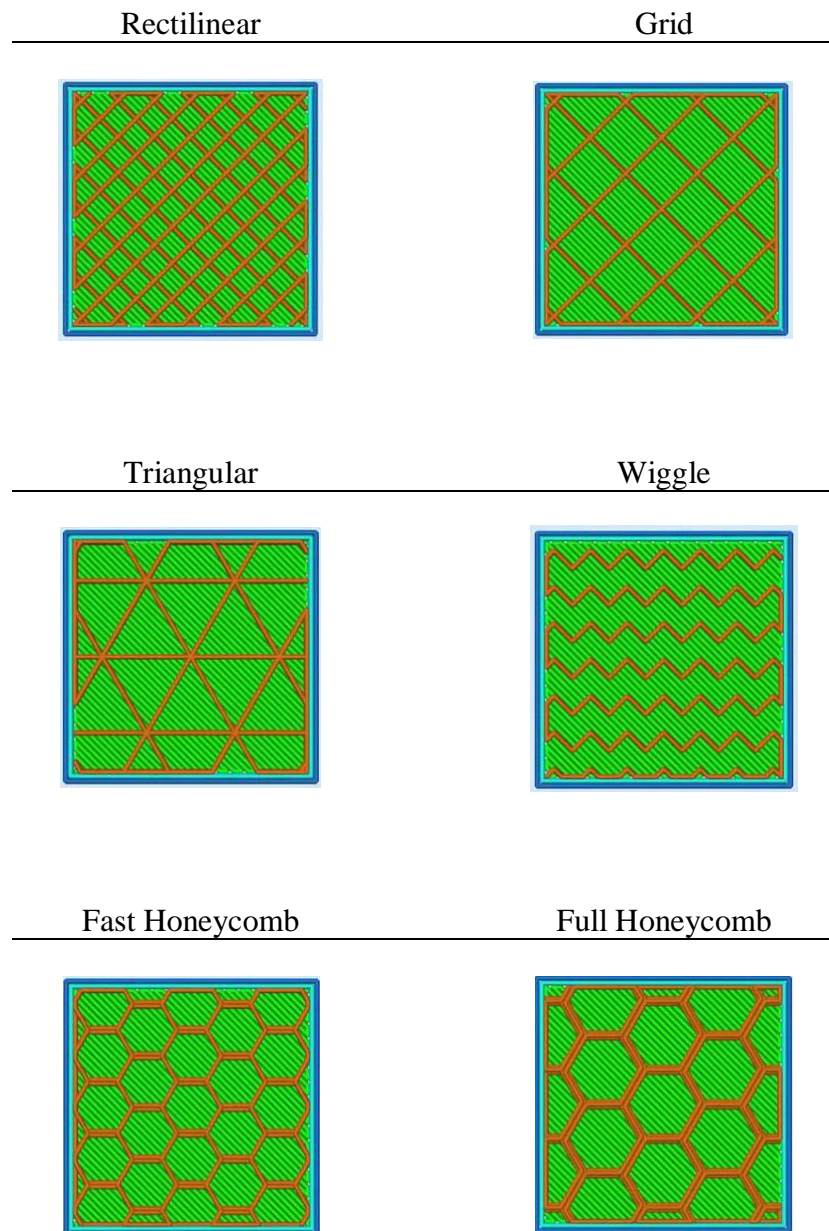


Figura 4. Diferents tipus d'emplenament del programa *Simplify3D* [24].

A l'hora de seleccionar el tipus d'emplenament s'ha de tenir en compte que uns són més complexes que altres i això presenta uns avantatges i inconvenients. La diferent complexitat d'un patró presenta unes propietats mecàniques diferents, es gastarà més o menys material i també varia el temps de fabricació. Tenint en compte aquests factors, s'hauria de fer un balanç per decidir si més complex implica millors propietats.

El *Timberfill* és un material que no ha estat molt estudiat, i per tant no es sap quin és el millor patró d'emplenament per obtenir millors propietats mecàniques. En aquest projecte s'estudiaran les propietats mecàniques imprimint amb *Honeycomb* ja que ha presentat bones propietats mecàniques en estudis anteriors [7, 16, 20], encara que seria interessant fer un estudi amb els altres patrons per el *Timberfill* ja que podria presentar unes altres propietats mecàniques respecte altres materials. I a partir dels resultats dels possibles futurs estudis, decidir quin patró és el més factible pel resultat que es vol obtenir.

Als ajustaments del programa a la pantalla d'emplenament permet variar altres factors que podrien ser determinants. Per exemple, com ja s'ha dit anteriorment, el nombre de capes realitzades amb el patró exterior. Aquest valor es deixarà el valor predeterminat. Un altre paràmetre que es deixarà predeterminat és l'ordre d'impressió també es deixarà el valor predeterminat pel propi programa i el patró s'anirà fent des de l'interior cap a l'exterior.

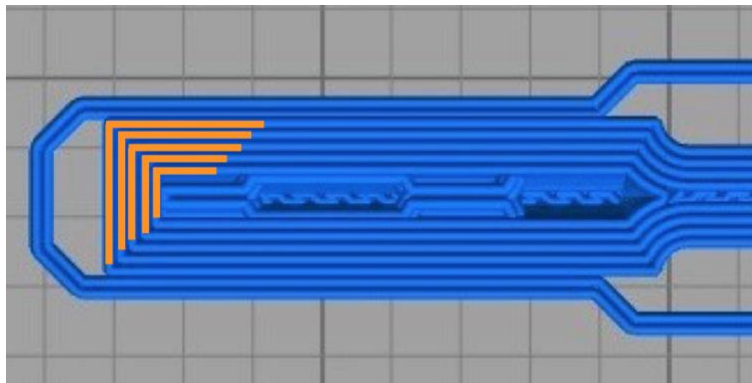


Figura 5. Detall de les capes exteriors.

Percentatge d'emplenament

El percentatge d'emplenament indica la quantitat de material respecte la quantitat d'aire. De manera que si el percentatge d'emplenament és del 100 % s'obtindria una peça massissa. En canvi, si es selecciona 0 % d'emplenament només estaria ple d'aire, per tant, seria una proveta buida, només tindria la part exterior.

Aquest paràmetre sí que serà un dels paràmetres importants variables. I els valors que s'hi associaran són (25, 50, 75) %. A la figura 6, es pot veure com és modificada la proveta depenent del percentatge aplicat.

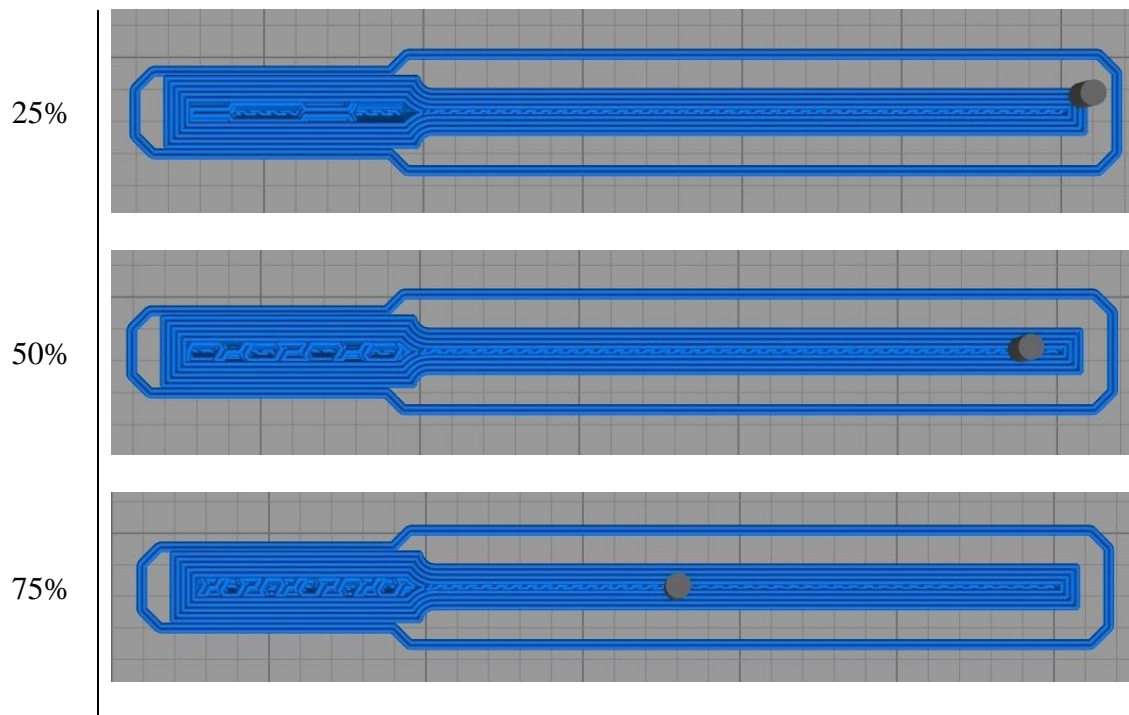


Figura 6. Percentatges d'emplenament utilitzats.

❖ Velocitat d'impressió

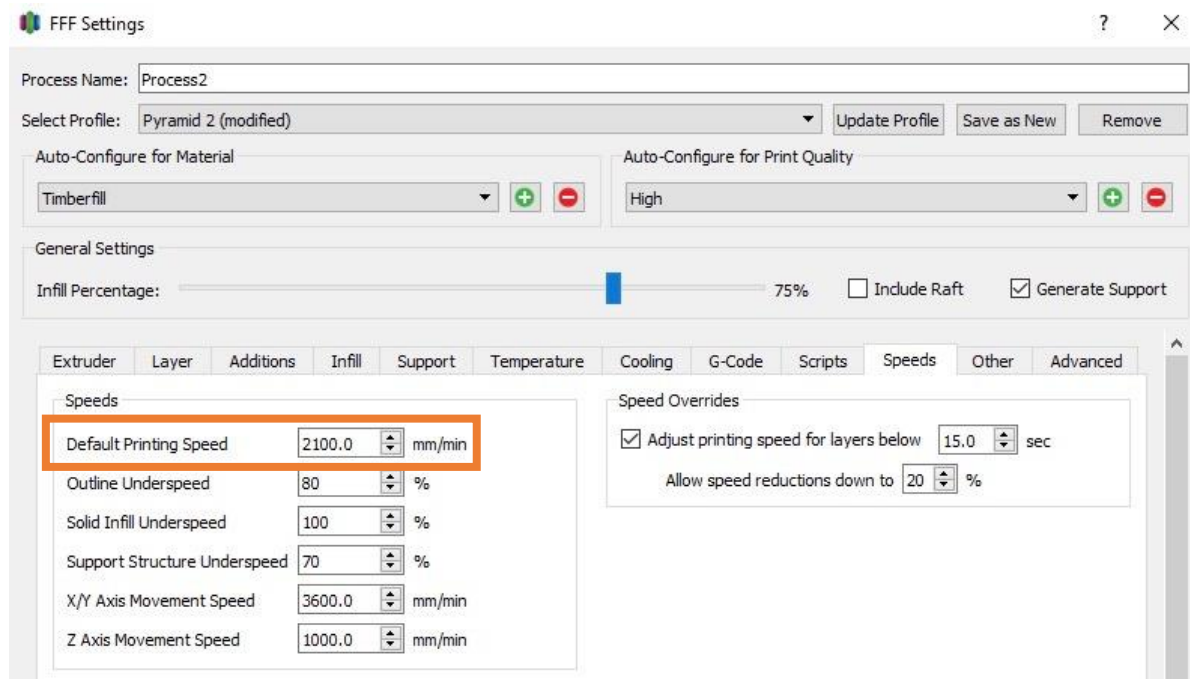


Figura 7. Paràmetres relacionats amb les velocitats.

A la figura 7 es pot observar que hi ha molts tipus de velocitats a l'hora d'imprimir per FDM. Dues velocitats ben diferenciades són la velocitat de la primera capa i la velocitat de la resta de mostra. La velocitat de la primera capa ha de ser una velocitat lenta ja que aquesta és la responsable que la peça impresa s'adhereixi a la base de la impressora i no provoqui problemes a l'hora d'imprimir. En canvi, la velocitat utilitzada per imprimir la peça causa canvis en les propietats mecàniques de les mostres. Per aquest motiu s'estudiarà aquesta velocitat i es variaran els valors per observar quina influència té a les propietats mecàniques. La velocitat de la primera capa es mantindrà amb el valor predeterminat.

La velocitat d'impressió adoptarà els valors (25, 30, 35) mm/min.

❖ Orientació

L'orientació d'impressió de la peça és un factor clau a l'hora d'estudiar la vida de les provetes. A les impressores 3D la direcció de les capes es pot imprimir respecte el pla XY, i la forma es dona respecte l'eix Z, que és l'eix vertical de les impressores 3D. Aquest paràmetre és decisiu ja que estudis anteriors mostren que idealment, la direcció de les capes ha d'estar orientada

amb la mateixa direcció que l'esforç a la que estarà sotmesa la proveta, i això provoca un comportament anisòtrop, ja que el la proveta presenta diferents propietats mecàniques depenent de la direcció de la força [3, 7, 8, 15]. Aquest comportament és degut a les forces que hi ha entre filaments. A mesura que es van dipositant unes capes sobre altres, els filaments es van unint entre sí produint un intercanvi de cadenes (secció B de la figura 8). Aquest fenomen només passa si la temperatura és suficientment alta com per a que es produeixi aquesta unió. Degut a això les forces a l'intercapa són més altes que les forces entre capes. Això produirà que l'inici de l'esquerda comenci a partir de dos filaments diferents. A la figura 8 es pot observar el comportament dels filaments quan es posen sobre la plataforma [1].

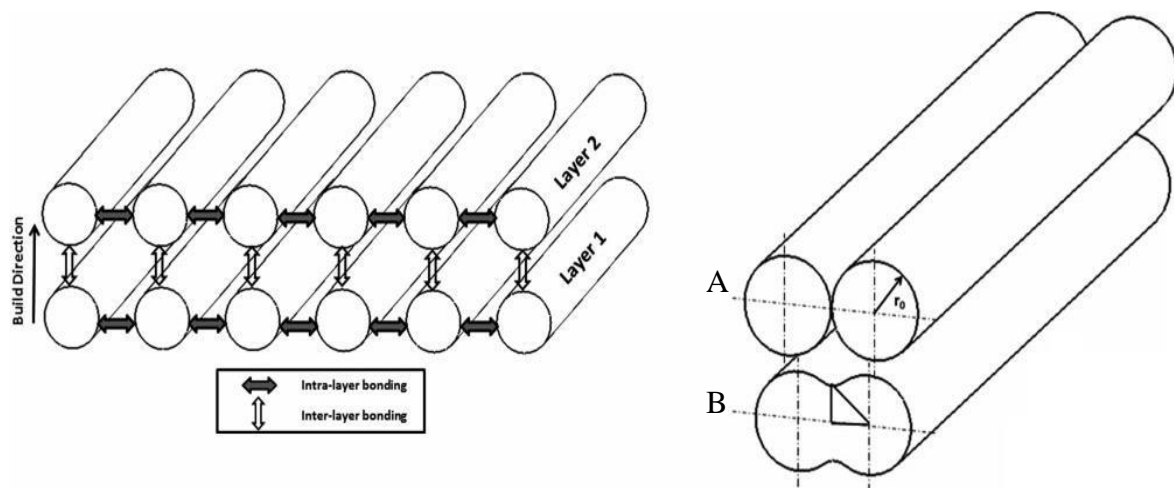


Figura 8. Comportament dels filaments una vegada s'han col·locat sobre la plataforma d'impressió. A- Contacte entre filaments. B- Unió dels filaments. [8]

Observant la figura 8, es veu com els filaments, que tenen una temperatura suficientment alta com per deformar-se, s'uneixen entre sí formant forces internes. Per tant, depenent de l'eix en que s'imprimeixi es crearan més o menys forces entre ells.

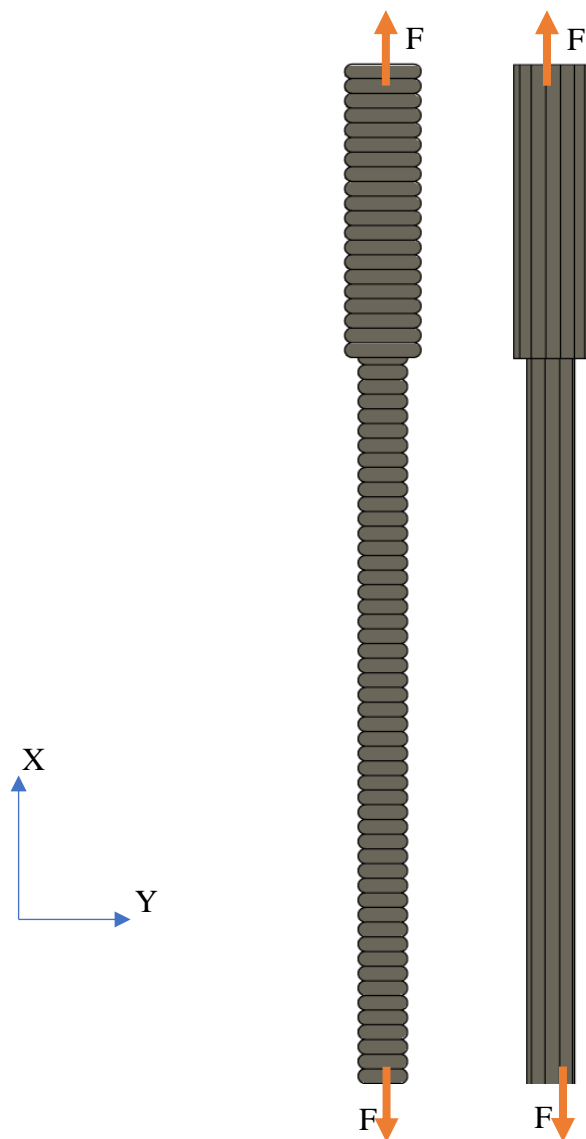


Figura 9. Representació de l'orientació dels filaments i l'orientació de la força.

Per tant, aquest no serà un paràmetre variable ja que s'ha demostrat que per els assajos a fatiga, la impressió respecte l'eix X permet una vida més llarga a les provetes, ja que, entre altres factors, les fibres estan orientades amb la mateixa direcció que la força [7].

1.3 COMPORTAMENT MECÀNIC FDM

D'entre totes les tècniques d'impressió que existeixen, per imprimir *Timberfill* s'utilitzarà la de *Material Extrusion*.

FDM és un procés molt típic d'aquesta tècnica. Aquest procés d'impressió 3D parteix d'un material sòlid en forma de filament. El material es va dipositant sobre una plataforma capa a capa fins a aconseguir la mostra final desitjada. El material es fon a l'extrusor i després es col·loca sobre la plataforma. Per dur a terme aquest tipus d'impressió 3D, és necessari imprimir també un suport [19].

El filament, de manera molt comuna, es situa sobre la impressora. El filtre agafa el material i el fon a la temperatura que s'ha indicat prèviament. Segons la impressora que s'utilitza, aquest filtre es pot moure respecte diversos eixos. La impressora *Pyramid 3D Studio* permet el moviment del filtre segons l'eix X i Z. El material que surt del filtre es diposita sobre una plataforma que també es troba a una temperatura determinada anteriorment. Aquesta plataforma, del mateix model d'impressora, es pot moure respecte l'eix Y. La temperatura de la plataforma és un paràmetre important ja que ajuda a que el material quedi enganxat a la plataforma i la impressió es pot acabar sense cap problema de fixament. Aquest problema s'explicarà al punt 2.4 d'aquesta memòria.

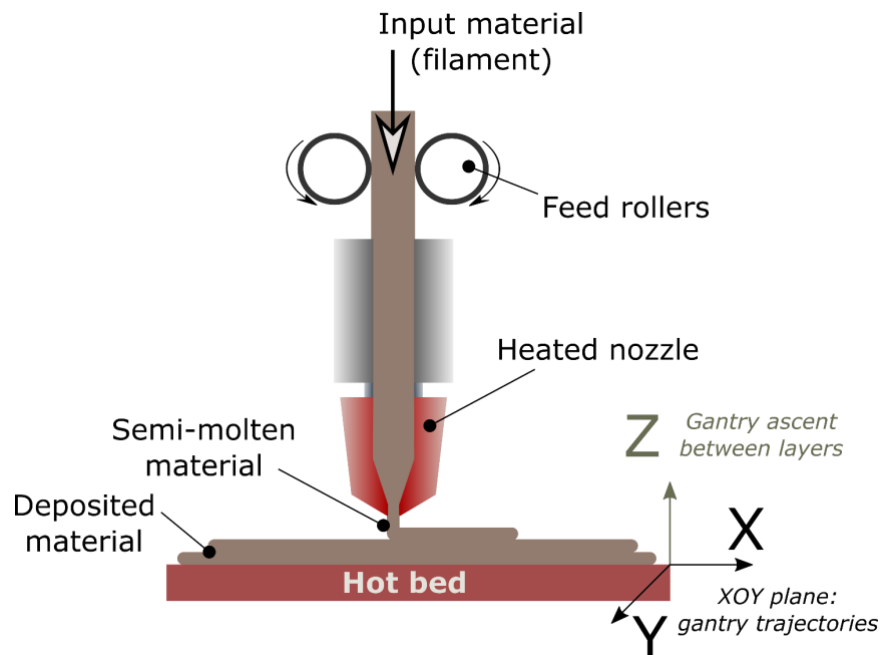


Figura 10. Esquema de funcionament d'un extrusor de la tècnica FDM [7].

Per imprimir les provetes s'ha de tenir en compte que la tècnica de FDM, que consisteix en fondre el polímer, necessita un suport a fi de que el material no es deformi quan s'imprimeix. Aquest suport ha de ser continu en tota la proveta ja que en cas contrari, el material cau entre les zones de suport i per tant, queda una peça deformada i, a conseqüència, amb propietats mecàniques més baixes.

La funció del suport és subjectar la proveta mentre s'imprimeix. Quan es dissenya s'ha de tenir en compte que quan el suport ja no sigui necessari (quan s'hagin d'assajar), ha de ser fàcil d'eliminar sense danyar la mostra final. Per aquest motiu, l'emplenament del suport serà diferent que l'emplenament de la proveta i el percentatge de densitat serà més baix per facilitar l'expulsió d'aquest. S'aprofitarà l'opció que presenta el programa *Simplify3D*, i el suport s'agregarà amb el mateix programa d'impressió. El programa dóna l'opció d'afegir-ho i definir els paràmetres desitjats. Com que el suport no canvia les propietats mecàniques finals de les mostres, per estalviar temps i material, s'utilitzarà l'emplenament que ofereix el software, que és el més senzill, el més ràpid, i és suficient per les provetes que s'imprimiran. S'ha de tenir en compte que la densitat d'emplenament ha de bastar per suportar la peça sent el mínim possible. Es definirà aquest paràmetre amb un 40%.

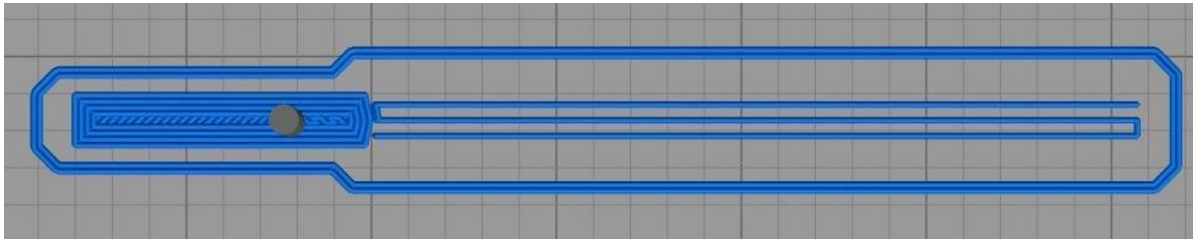


Figura 11. Suport implementat al programa *Simplify3D*.

A la figura 11 es pot observar que el suport està format per tres línies horitzontals, això és degut a que el diàmetre de l'extrusor utilitzat per aquesta imatge és de 0.7mm i el programa aplica les tres línies. En el cas de 0.5 mm i 0.6 mm de diàmetre el suport estarà format per quatre línies horitzontals ja que amb menor diàmetre, s'ocupa menys espai.

1.4 TIMBERFILL

El *Timberfill* és un material compost, 100% biodegradable, format per una matriu PLA i entre un 5-10% de fibres de fusta. El material presenta unes propietats mecàniques semblants al PLA i ABS a més d'un acabat amb aspecte de fusta.

És un material fabricat específicament per a la tecnologia d'impressió 3D FDM. Les propietats d'impressió són molt similars al PLA, es pot obtenir una gran qualitat d'impressió amb tots els detalls.

Physical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Material density	1,28 g/cm ³	ISO 1183	
Melt volume index	20 cm ³ /10 min	ISO 1133	190 °C, 2,16 kg
Diameter tolerance	± 0,01 mm		
Weight	750 g of filament (+ 250 g spool)		

Mechanical properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Tensile strength	33,3 MPa	ISO 527	
Tensile modulus	2800 MPa	ISO 527	
Elongation at break	2,87 %	ISO 527	
Charpy impact strength	15,1 kJ/m ²	ISO 179	23 °C
Charpy impact strength	2,8 kJ/m ²	ISO 179	23 °C, notched
Ball indentation hardness	105 MPa	ISO 2039	

Thermal properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Melting temperature	145-160 °C		
Glass transition temperature	55-60 °C		
Flammability	388 °C		Autoignition temperature

Printing properties	Typical Value	Test Method	Test Condition
Print temperature	170-185 °C		
Hot pad	40-50 °C		
Speed of printing	20-30 mm/s		

Figura 12. *Datasheet* Timberfill [21].

A la figura 12 es poden observar els valors recomanats pel fabricant. Però aquests valors només són de referència ja que el material encara s'està estudiant. Apart, els valors d'impressió, per exemple, depenen de la impressora utilitzada. Així que és possible que sigui necessari imprimir a una temperatura de l'extrusor més alta o més baixa que el que realment recomana el fabricant. Per aquest motiu, els valors del *Datasheet* seran només valors orientatius.

2. DESCRIPCIÓ DELS EXPERIMENTS

2.1 PROVETES

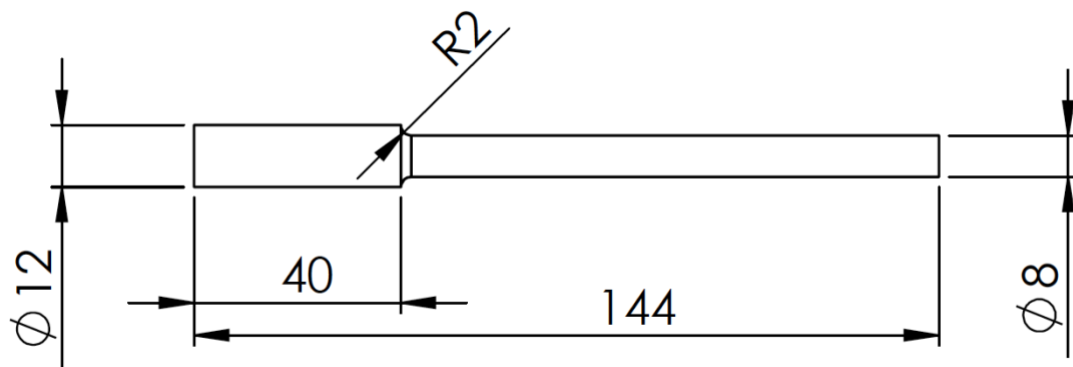


Figura 13. Mesures de les provetes impreses.

Les mesures introduïdes al model de CAD són les mostrades a la figura 13. Les dimensions usades són les adequades per fer ús de la màquina de fatiga a la qual s'assajaran aquestes mostres.

No hi ha una normativa ISO concreta per als polímers impresos segons AM i assajats a fatiga. Per aquest motiu, a l'hora de dimensionar les provetes de Timberfill per a la fabricació d'Additive Manufacturing es segueix la normativa ASTM D7774 [5].

Hi ha molts paràmetres que determinen la impressió d'una peça. Però depenent de la impressora utilitzada aquesta peça impresa tindrà uns resultats més o menys semblants a la informació enviada a la impressora segons el model CAD a causa d'errors i desviacions.

La impressora utilitzada per aquest projecte és la *Pyramid 3D Studio*. S'han fet estudis previs de les desviacions sobre les toleràncies geomètriques i dimensionals que presenten les peces impreses amb aquest model d'impressora respecte el disseny CAD que es vol obtenir. Els

resultats mostren que hi ha un cert error en la impressió depenent de l'eix en que s'imprimeix i de la forma geomètrica que es vol aconseguir [9]. És per aquest motiu que les peces impreses poden no satisfer els resultats esperats.

2.2 MÀQUINES I APARELLS UTILITZATS

❖ Impressora 3D

El model de la impressora 3D que s'utilitzarà és la *Pyramid 3D Studio*. El principi físic de la impressora *Pyramid 3D Studio* es pot veure representat a la figura 14. El filtre té el moviment restringit només a l'eix Y, per tant, es pot moure respecte l'eix X i respecte l'eix Y. La plataforma és la part de la impressora que té moviment respecte l'eix Y.

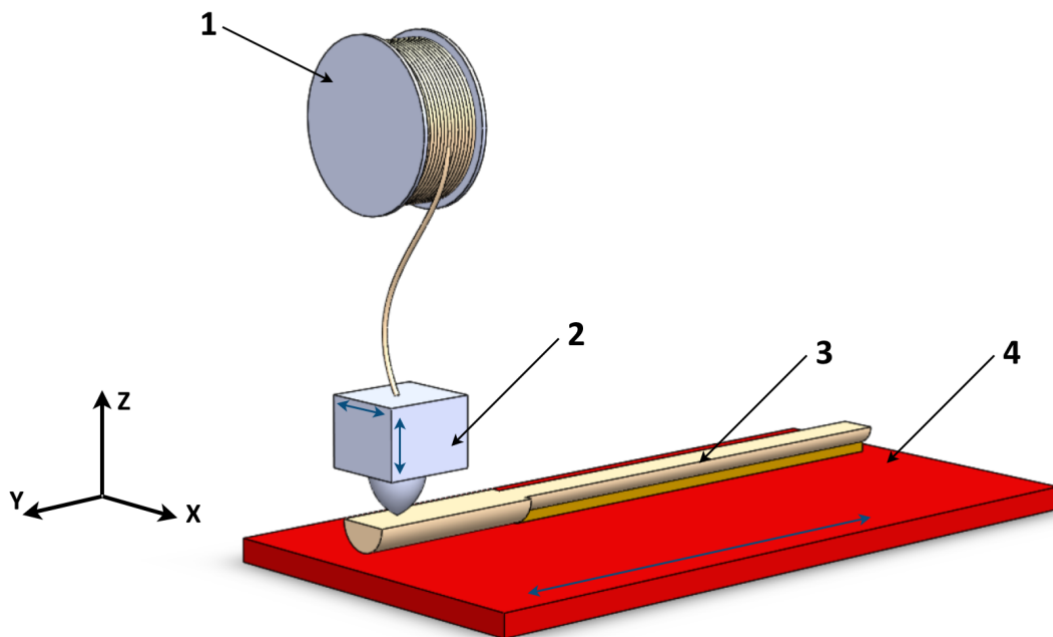


Figura 14. Esquema del principi físic de la impressora *Pyramid 3D Studio*. 1- Filament del material. 2- Extrusor. 3- Mostres impreses. 4- Plataforma.

❖ Màquina assajos fatiga

La màquina GUNT WP 140 és la màquina utilitzada per dur a terme la ruptura a fatiga de les provetes fabricades.

Com s'observa a la figura 15, aquesta màquina consta d'un motor elèctric rotatiu que fa rotar a la proveta que s'assaja. La velocitat d'aquest motor és constant, 2800rpm. L'extrem més gruixat de la proveta es fixa al motor mentre que l'altre extrem es fixa a la part més baixa del manòmetre. Un cop s'ha fixat, es col·loca la tapa protectora (ja que si no es fa ús d'aquesta, el motor no funcionarà per seguretat, ja que el sensor no detecta la posició correcta de la tapa), i s'aplica la força desitjada amb el manòmetre. Per tant, la proveta també estarà sotmesa a una flexió alternant. Un cop s'ha establert aquesta força, s'inicia el moviment del motor fins que la proveta romp.

Quan la peça rota, hi ha un sensor electrònic que compta els cicles de rotació que es sumen a la vida de la peça. La màquina disposa d'un sensor que la seva utilitat és detectar quan la peça ha romput i parar en el moment de ruptura, de manera que el sensor electrònic deixa de comptar els cicles quan s'ha acabat la vida de la proveta. Per tant, en el moment en que la peça ja està rompuda, es poden veure els cicles de vida que ha tingut la mostra a la pantalla de sobre la caixa de distribució.

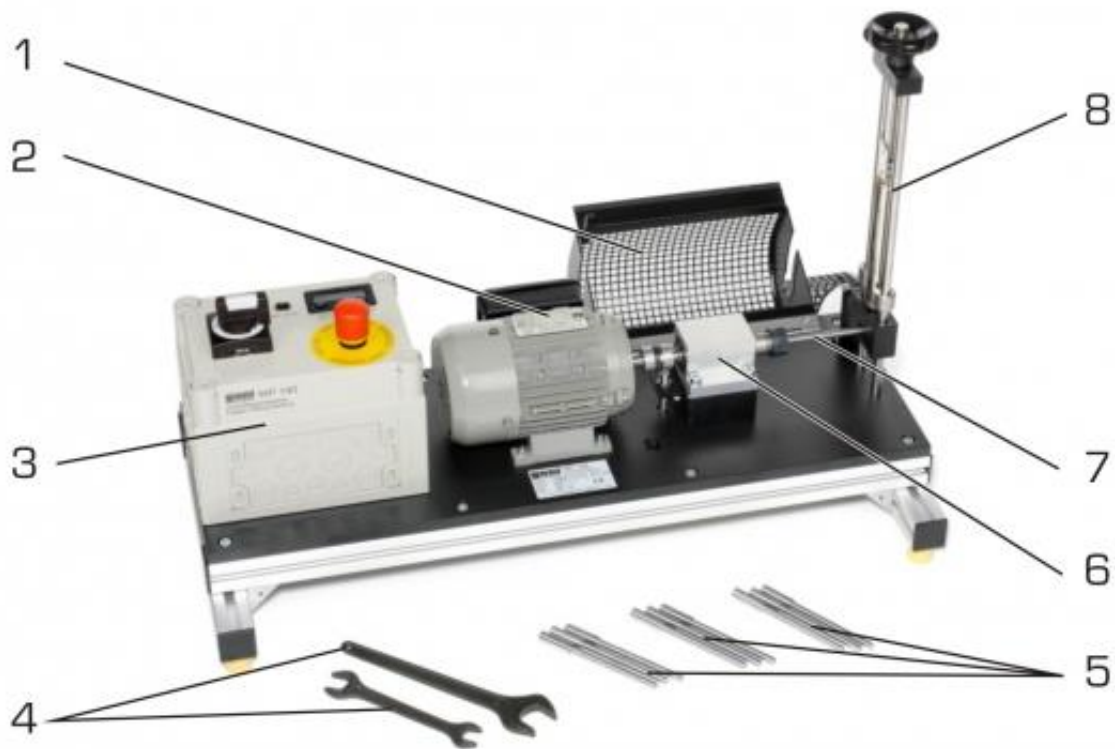


Figura 15. Màquina assajos fatiga. 1- Coberta protectora. 2- Motor elèctric. 3- Caixa de distribució. 4- Eines. 5- Provetes. 6- Recolzament. 7- Proveta fixada. 8- Manòmetre. [23]

Aquesta màquina ha estat fabricada per funcionar amb provetes d'acer encara que nosaltres l'utilitzarem amb provetes de plàstic. El manòmetre, per tant, no té molt bona precisió ja que quan s'aplica una força per fer l'assaig a fatiga l'acer, s'hi apliquen entre 200N i 300N. Per a aquests valors, cinc Newtons no són significants com ho seran per al *Timberfill*, ja que s'hi aplicarà una força de 10N. És per això que per poder fer els experiments més fiables i els més precisos possibles, s'utilitzarà un software anomenat Spider 8-30 que permet aplicar la càrrega de manera molt precisa.

❖ Spider 8-30 i Catman

L'Spider és un hardware que treballa amb el software Catman. Aquest software permet l'adquisició de dades de manera molt precisa. Les dades obtingudes a partir d'aquest software seran, posteriorment, processades i analitzades per obtenir els resultats dels experiments.

Aquest software s'utilitzarà per observar la força exacta aplicada a les provetes i també per observar el temps que tarda a rompre cada proveta, ja que quan romp es produeix una variació de la força molt notable.

L'Spider 8-30 consta de 8 sortides que permeten obtenir resultats de diferents estudis. En aquest projecte, s'utilitzarà el canal anomenat Cel·la S2M 50N per rebre les dades de la fatiga. Per tant, serà a aquest canal on s'observaran la força aplicada a les mostres i el moment de ruptura.

El canal de la fatiga dissenya un gràfic de la força de fatiga respecte el temps.

Connexions Spider 8-30

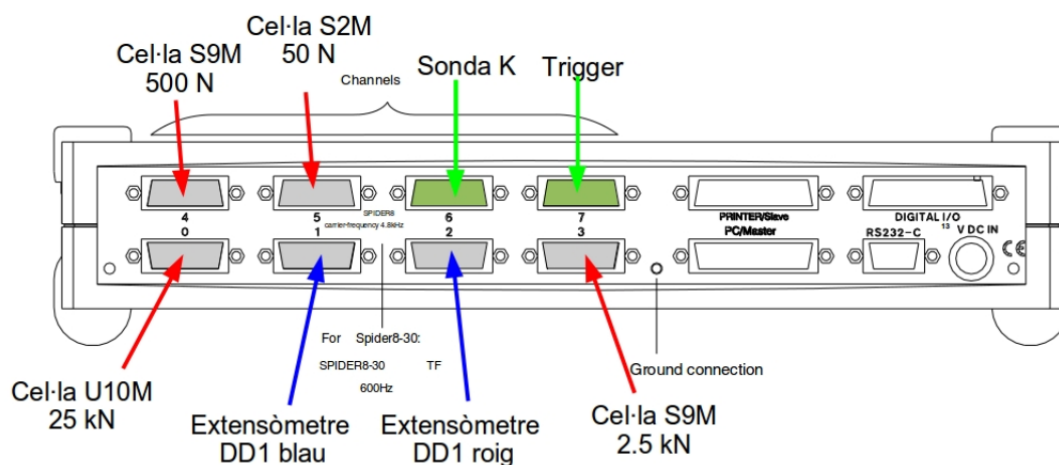


Figura 16. Connexions *Spider 8-30* [2].

A la figura 17 es mostra l'aplicació de força. Es poden observar fluctuacions, això és degut a que el material mostra un comportament flexible, per tant, es va deformant a mesura que s'aplica la força. En aquesta imatge en concret es mostra com s'apliquen uns 13N aproximats.

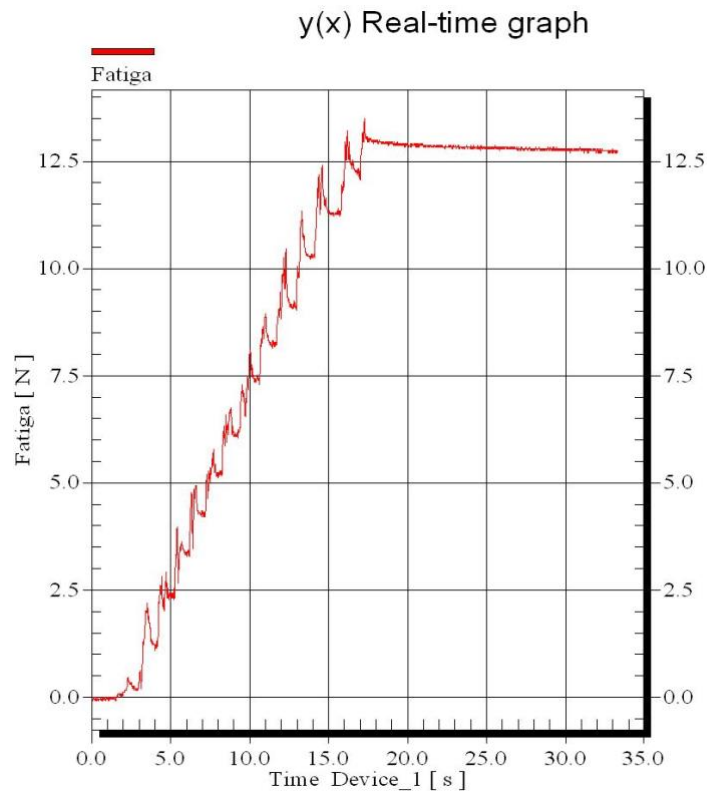


Figura 17. Gràfica d'aplicació de forces a *Spider* 8-30.

❖ Càmera tèrmica

Una càmera tèrmica serveix per detectar les temperatures de diferents objectes. És una càmera per fer un anàlisi de la termografia de construcció o altres aplicacions.

Per a aquest projecte s'ha utilitzat la Càmera PCE-TC3.



Figura 18. Càmera PCE-TC3 [8].

Aquest model presenta un error de mesura màxim de $\pm 2^{\circ}\text{C}$, en un rang de temperatura d'entre els -10°C i 250°C [8]. En aquest projecte, és necessari un error mínim ja que s'espera que la temperatura sigui constant, com ja s'ha conclòs a estudis anteriors [16].

Encara que a la pantalla es pot llegir directament el valor màxim i mínim de temperatures del lloc on s'enfoca, l'aparell també presenta la possibilitat d'enviar totes les dades adquirides a un ordinador. A més, la màquina té un làser integrat que permet localitzar el punt exacte estudiat, el làser és molt important ja que interessa l'estudi de temperatura al punt de ruptura, que és un punt molt concret [8].

Totes aquestes especificacions fan que la mesura sigui molt precisa, a fi de comparar la temperatura amb altres paràmetres estudiats en aquest projecte.

2.3 DISSENY D'EXPERIMENTS TAGUCHI

Per fer l'estudi d'aquest projecte, es variem els quatre paràmetres d'impressió més influents per definir les propietats mecàniques d'una proveta, i cada paràmetre s'associa a tres valors diferents. Després de decidir quins són els quatre paràmetres més importants, els valors dels paràmetres s'han de combinar entre sí amb totes les combinacions possibles. Per tant, s'haurien de dur a terme 3^4 combinacions per a cobrir cada un dels casos. A part, també s'ha de tenir en compte que perquè l'experiment sigui vàlid i amb una alta fiabilitat de cada possible combinació se n'han de fer cinc experiments, a fi de reduir els errors que hi pugui haver. És a dir, s'haurien de fer 5 mostres de les 81 combinacions. Això implica 405 provetes impreses, i 405 assajos. És inevitable preveure que el temps invertit serà molt, i a més, es necessitarà molt de material.

És per això que s'utilitzarà el mètode estadístic de Taguchi, per optimitzar aquest procés i reduir el nombre de provetes assajades i impreses. Aquest mètode és un procediment matemàtic que indica les agrupacions de valors que s'han de fer per assegurar que es fan les necessàries per trobar la combinació òptima.

El procediment serà el següent: es variaran només els valors d'aquests quatre paràmetres, s'observaran els resultats, i s'escollirà la millor combinació de valors [7]. A la taula 1 es poden observar els valors de cada paràmetre.

Taula 1. Factors i nivells utilitzats per a aplicar l'estudi estadístic de Taguchi.

Factor		Codi	Nivell		
			1	2	3
Alçada de capa	[mm]	A	0.2	0.3	0.4
Diàmetre de l'extrusor	[mm]	B	0.7	0.5	0.6
Densitat d'emplenament	[%]	C	25	50	75
Velocitat d'impressió	[mm/min]	D	25	30	35

Basant-se amb estudis previs [7], s'aplicarà una matriu L27 del mètode de Taguchi als valors determinats anteriorment. D'aquesta manera es pot analitzar la influència que tindran cada un dels paràmetres a l'experiment de fatiga. Per fer-ho, s'introdueixen les dades de la taula 1 al

programa *Minitab* i aquest procedirà amb una taula de 27 combinacions que seran les que finalment s'utilitzaran per imprimir les provetes.

Taula 2. Combinacions utilitzades per a la fabricació de les provetes.

Mostra	A	B	C	D
1	0.2	0.7	25	25
2	0.2	0.7	50	30
3	0.2	0.7	75	35
4	0.2	0.5	25	35
5	0.2	0.5	50	30
6	0.2	0.5	75	25
7	0.2	0.6	25	35
8	0.2	0.6	50	25
9	0.2	0.6	75	30
10	0.3	0.7	25	30
11	0.3	0.7	50	35
12	0.3	0.7	75	25
13	0.3	0.5	25	35
14	0.3	0.5	50	25
15	0.3	0.5	75	30
16	0.3	0.6	25	25
17	0.3	0.6	50	30
18	0.3	0.6	75	35
19	0.4	0.7	25	35
20	0.4	0.7	50	25
21	0.4	0.7	75	30
22	0.4	0.5	25	25
23	0.4	0.5	50	30
24	0.4	0.5	75	35
25	0.4	0.6	25	30
26	0.4	0.6	50	35
27	0.4	0.6	75	25

A la taula 2, s'observa el resultat de Taguchi. Aquestes són les combinacions que s'utilitzaran per imprimir les provetes. Aquestes 27 combinacions asseguren que l'estudi té en compte tots els casos possibles per fer el projecte manera òptima.

2.4 EXECUCIÓ EXPERIMENTAL

L'execució experimental es pot dividir en dues parts, la primera és la fabricació de les provetes i la segona és l'estudi de la vida de les provetes.

2.4.1 Fabricació de les provetes

Per estudiar les propietats mecàniques d'un material, es necessiten fabricar provetes a partir d'aquest material. En el cas del *Timberfill*, per fabricar les provetes s'utilitza una tècnica d'Additive Manufacturing, FDM. Ja que és un material poc estudiat, no es sap quin comportament tindrà aquest a l'hora d'imprimir-se.

Existeixen diferents tipus d'error quan es fabriquen les peces. Per aquest motiu de cada disseny de Taguchi s'imprimiran cinc mostres de manera que, si hi ha un error de fabricació o experimental per part d'una de les màquina, es rebutjarà el resultat que doni uns valors molt allunyats a la resta. D'aquesta manera s'evita alterar els resultats finals deguts a possibles errors de fabricació o d'assaig.

Durant el procés de fabricació existeixen diversos problemes típics dels quals alguns han dificultat la impressió dels exemplars impresos. A continuació s'expliquen els problemes més destacats a l'hora d'imprimir el *Timberfill* [24].

❖ Extrusor obstruït

Aquest problema és freqüent en el *Timberfill* ja que és un polímer amb fibres de fusta i aquestes fibres poden obturar els extrusors si tenen un diàmetre de sortida petit més fàcilment que el plàstic pur. Com a conseqüència, l'extrusor no pot continuar dipositant el material. Aquesta dificultat fa que es gastin materials ja que si passa quan s'ha imprès

només una part de les provetes, s'ha de llançar tot el que s'ha fet i tornat a començar perquè el fet de que l'extrusor quedi obstruït no implica que la impressora quedi pausada, sinó que l'extrusor continua fent el mateix moviment sense deixar sortir el material, per això el procés no es pot restablir un cop hi ha hagut una obstrucció. Per tant, també s'observa una pèrdua de temps [24].

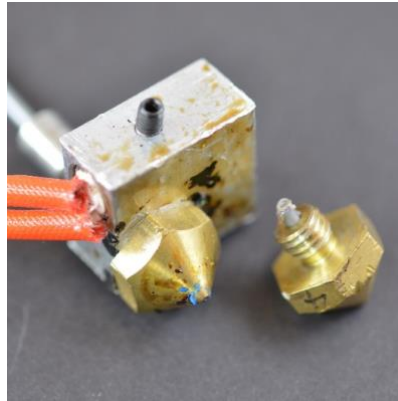


Figura 19. Extrusors obstruïts [24].

❖ Falta de suport

El material cau quan és imprès entre dos punts els quals no tenen un suport a sota. Aquest fet passa quan, en algunes ocasions, s'intenta imprimir sense el suport ja que així es guanya temps i no es gasta tant de material. El propi pes del material fa que s'observi aquest problema i és per això que normalment, quan s'imprimeix amb la tècnica de FDM són necessaris uns suports a les parts que no es disposen sobre material. En cas contrari, no s'obté la forma de la mostra final desitjada, i en el cas de mostres que es volen utilitzar en àmbit mecànic, es poden percebre una manca propietats mecàniques [24].

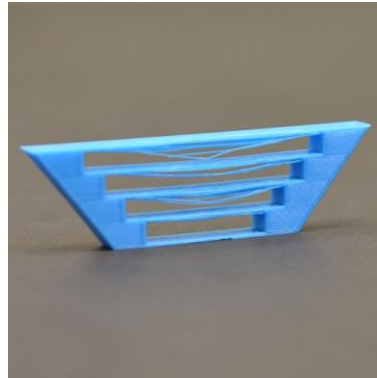


Figura 20. Falta de suport [24].

❖ Els exemplars no s'enganxen a la plataforma

La primera capa de material és molt important ja que fa que l'objecte imprès sigui el més precís i tingui el millor resultat possible. Si aquest objecte no queda subjecte a la plataforma, el material és arrossegat per l'extrusor i no és possible continuar amb una impressió precisa. Aquesta subjecció depèn de la primera capa, que serà diferent pels diferent tipus de materials. Uns s'enganxaran millor que d'altres. Per ajudar a obtenir una millor adhesió, algunes impressores permeten canviar la temperatura d'aquesta plataforma però de vegades, canviant aquesta temperatura segueix sense enganxar-se bé. També s'ha de tenir en compte que la velocitat d'impressió es recomana que es redueixi un 30-50% de la velocitat d'impressió de la mostra, millorant així el contacte entre la mostra i la plataforma [24].

Aquest problema es pot solucionar de diverses maneres. S'ha de netejar la plataforma assegurant-se que no hi ha pols ni restes de materials. Si això no funciona, pot posar-s'hi alcohol. I si encara no s'observen bons resultats, es pot utilitzar cinta adhesiva, cola especial per impressió 3D, o bé laca per cabells [24].

Aquest fenomen també causa una pèrdua de material i temps.

2.4.2 Estudi a fatiga

Una vegada s'han fabricat les provetes, s'assagen a fatiga fins que rompen, però hi ha varis factors a tenir en compte.

Durant els experiments hi poden haver errors, per això, de cada tipus de proveta diferent se'n proven cinc. El resultat final serà la mitjana d'aquestes cinc. Això fa que si alguna proveta romp a un moment no esperat, a partir de les altres, que mostren un resultat allunyat de la proveta amb error, es pugui descartar el resultat.

D'altra banda, tots els experiments es faran amb els mateixos factors pel que fa la fatiga, d'aquesta manera es podran comparar els resultats finals a fi de trobar una correlació entre paràmetres. A la màquina de fatiga és necessari definir la força que aplicarà a la proveta. Es necessita trobar un valor de força que no sigui massa alt, ja que les provetes rompien molt ràpidament, ni massa baix, ja que algunes provetes podrien tenir vida infinita. Tenint en compte que es treballa amb un polímer, s'ha decidit aplicar una força de 10N.

3. RESULTATS DELS EXPERIMENTS

3.1 RESISTÈNCIA A LA FATIGA

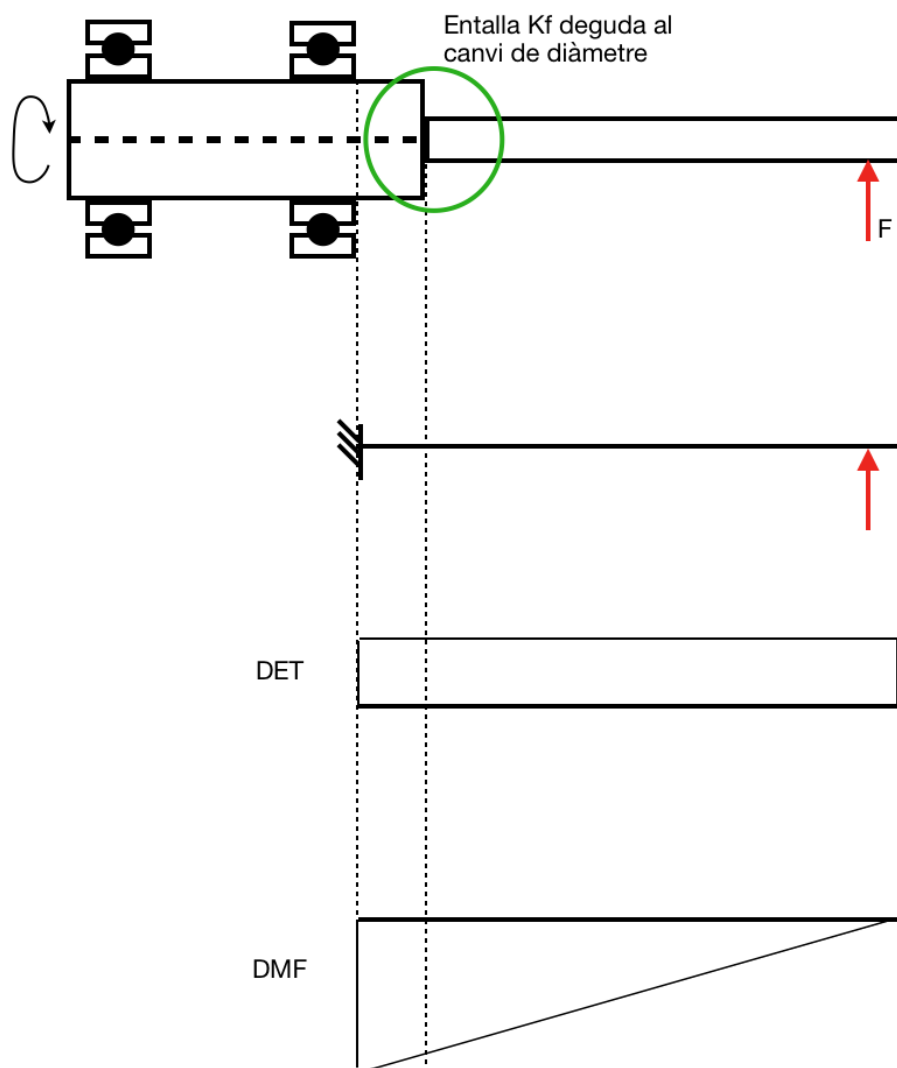


Figura 21. Diagrama de forces a una proveta.

Durant un assaig de fatiga s'observa un esforç tallant i un moment flector. Representant aquests diagrames de forces que s'apliquen sobre la proveta durant els cicles a fatiga, s'observa com afecta la força aplicada a la mostra. La força causa un esforç tallant i un moment flector. El diagrama d'esforç tallant és constant a tota la peça, en canvi, el diagrama de moment flector mostra com és menor a mesura que s'allunya de la part fixada. A més, la proveta presenta un factor d'entalla degut al canvi de diàmetre. A partir de tots aquests elements a tenir en compte, es localitza la secció crítica on hi ha el canvi de diàmetre. Per tant, teòricament, la mostra romprà a aquesta secció.

La força aplicada a les mostres és de 10N ja que aquesta força assegura que totes les peces rompin i suportin un nombre mínim de cicles per poder formar les conclusions.

A la figura 22, s'observa que les mostres han fallat a la secció esperada, cosa que indica que els experiments han estat ben executats i per tant, les provetes rompen a causa d'haver superat la tensió límit de la mostra i no per altres motius, com podrien ser els errors d'impressió o bé altres factors.

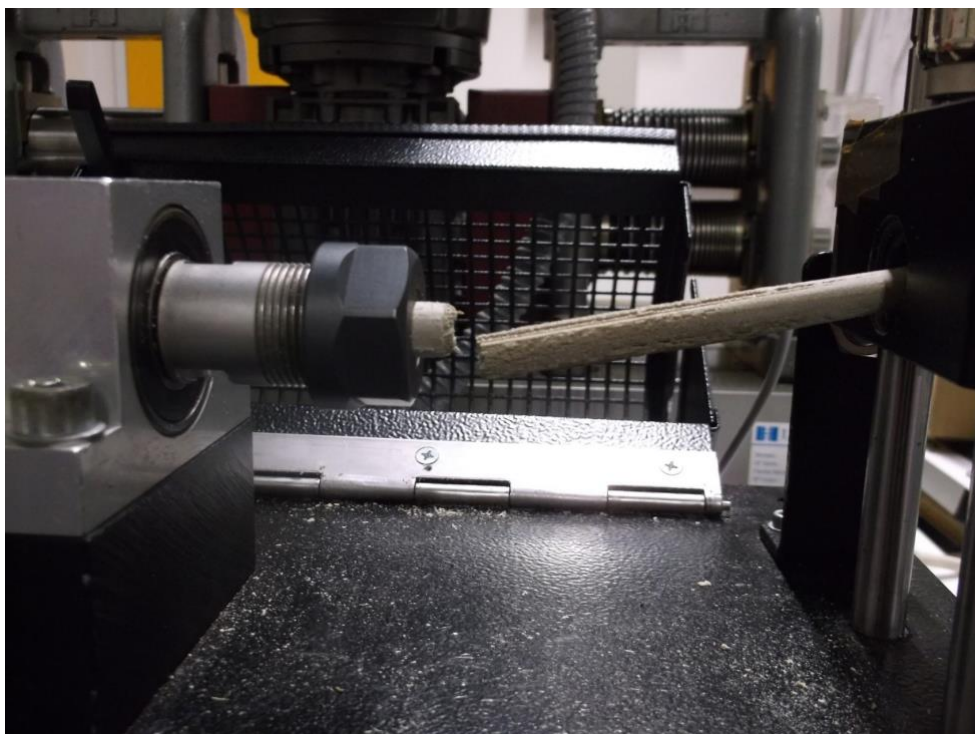


Figura 22. Ruptura de les mostres per fatiga.

3.1.1 Resultats resistència a la fatiga

Per fer l'assaig verídic, s'han assajat cinc provetes de cada combinació diferent. D'aquestes cinc se n'ha fet la mitjana i s'han trobat els resultats de la taula 3. El nombre de cicles mostrats es tradueix a la vida que ha tingut cada mostra. Per tant, la millor combinació de Taguchi vindrà donada per aquelles mostres que hagin tingut una vida més llarga, és a dir, la combinació que tingui la mitjana del nombre de cicles més alta.

Taula 3. Nombre de cicles de vida de cada mostra.

Mostra	Mitjana nombre de cicles
1	1580.4
2	4819.4
3	1648.0
4	919.3
5	428.2
6	716.6
7	654.0
8	913.3
9	1432.3
10	1751.4
11	4897.4
12	6456.3
13	698.8
14	387.2
15	2467.2
16	935.4
17	746.2
18	1342.6
19	2518.2
20	1327.2

21	2067.2
22	1103.0
23	1427.2
24	582.0
25	1518.5
26	1054.0
27	1646.0

S'observa que les mostres de la combinació 12 tenen una mitjana de cicles de 6456.3, que és el nombre més elevat i implica ser la millor combinació per al *Timberfill*. A la taula 4 es poden veure els paràmetres de la millor mostra.

Taula 4. Paràmetres de la millor combinació trobada.

Material	Alçada de capa [mm]	Diàmetre de l'extrusor [mm]	Densitat d'emplenament [%]	Velocitat d'impressió [mm/min]
Timberfill	0.3	0.7	75	25

Per a saber quin paràmetre té més influència sobre els resultats, s'aplicarà l'estudi estadístic de Taguchi.

El programa *Minitab* permet fer un estudi (DOE) on es resol l'estudi mostrant de manera gràfica i numèrica la influència de cada paràmetre sobre el resultat final. Llavors, a partir d'aquest programa s'obtenen els següents resultats.

3.1.1.1 Efectes principals per a Mitjanes

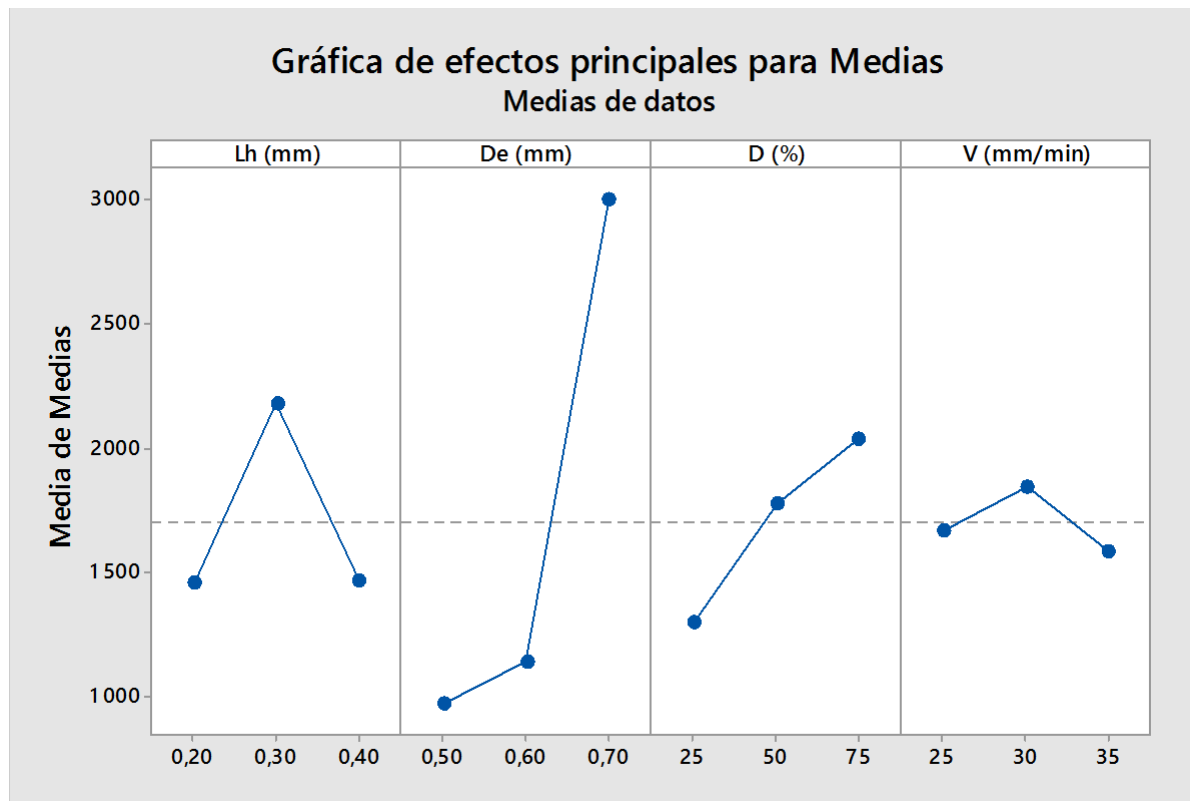


Figura 23. Efectes principals per mitjanes de nombre de cicles fins a la ruptura.

La figura 23 mostra la influència dels factors d'impressió utilitzats sobre la ruptura a fatiga. Es veu que el diàmetre de l'extrusor (De) és el que major efecte té sobre la vida de les mostres. Al gràfic es pot observar que com més gran és el diàmetre, major és la vida de les probetes, ja que quan el diàmetre és de 0,7, el nombre de cicles de vida és el major. La pendent que defineix aquesta funció és molt elevada, per tant, s'aconsegueixen uns resultats molt millors amb major diàmetre.

El gràfic també permet observar el comportament dels altres factors, encara que es vegi que no són tant influents.

En quant a l'alçada de capa (Lh), s'observa que el millor valor d'alçada de capa és 0,3 ja que dona una vida més llarga, i els valors de 0,2 i 0,4 tenen un efecte sobre el nombre de cicles

molt semblant i proporcionen menys vida a la proveta. Aquest factor és generalment menys influent perquè el rang entre el valor mínim i màxim no és tant ampli.

La densitat d'emplenament (D) té un rang similar al de l'alçada de capa, per tant, no és molt influent. Però aprofitant el gràfic adquirit, s'observa que com més densitat d'emplenament presenta una proveta, més llarga és la vida d'aquesta.

Per últim, s'observa que la velocitat varia el seu valor de manera molt poc significativa. Per aquest motiu, es conclou que la velocitat no té quasi efecte sobre la vida de les mostres.

A fi d'obtenir aquests resultats de manera analítica, es creen els p-valors de cada un dels paràmetres. Com que s'utilitza un nivell de significació del 10%, per a que un paràmetre es consideri estadísticament significatiu, s'ha d'obtenir un p-valor inferior a $\alpha = 0.1$. És a dir, un paràmetre serà estadísticament significatiu quan $p - \text{valor} < \alpha$.

Taula 5. Valors dels p-valors donats pel programa Minitab.

Factor	P-valor
Alçada de capa	0.408
Diàmetre extrusor	0.022
Densitat d'emplenament	0.508
Velocitat	0.934

A partir de la taula 5, es conclou que l'únic factor estadísticament significatiu és el diàmetre de l'extrusor, ja que $0.022 < \alpha$. I es veu com la velocitat té un valor molt elevat, cosa que mostra que, efectivament, aquest és un paràmetre molt poc significatiu.

Per tant, el paràmetre més influent per la duració de la vida de les provetes és el diàmetre de l'extrusor. De fet, si s'obté el gràfic del nombre de cicles respecte el nombre de combinació de cada mostra (figura 23), s'observa com, clarament, les mostres amb diàmetre 0.7 tenen una vida més llarga.

3.1.1.2 Interacció per a Mitjanes

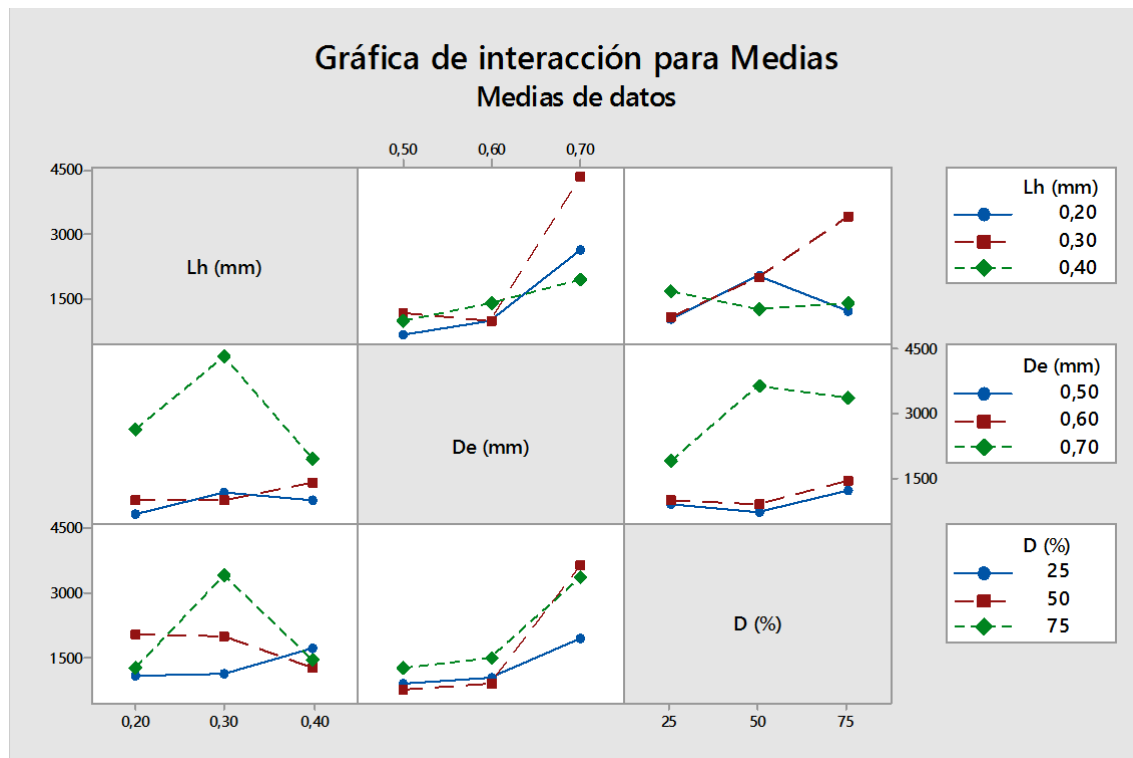


Figura 24. Interacció entre els valors per mitjanes de nombre de cicles fins a la ruptura.

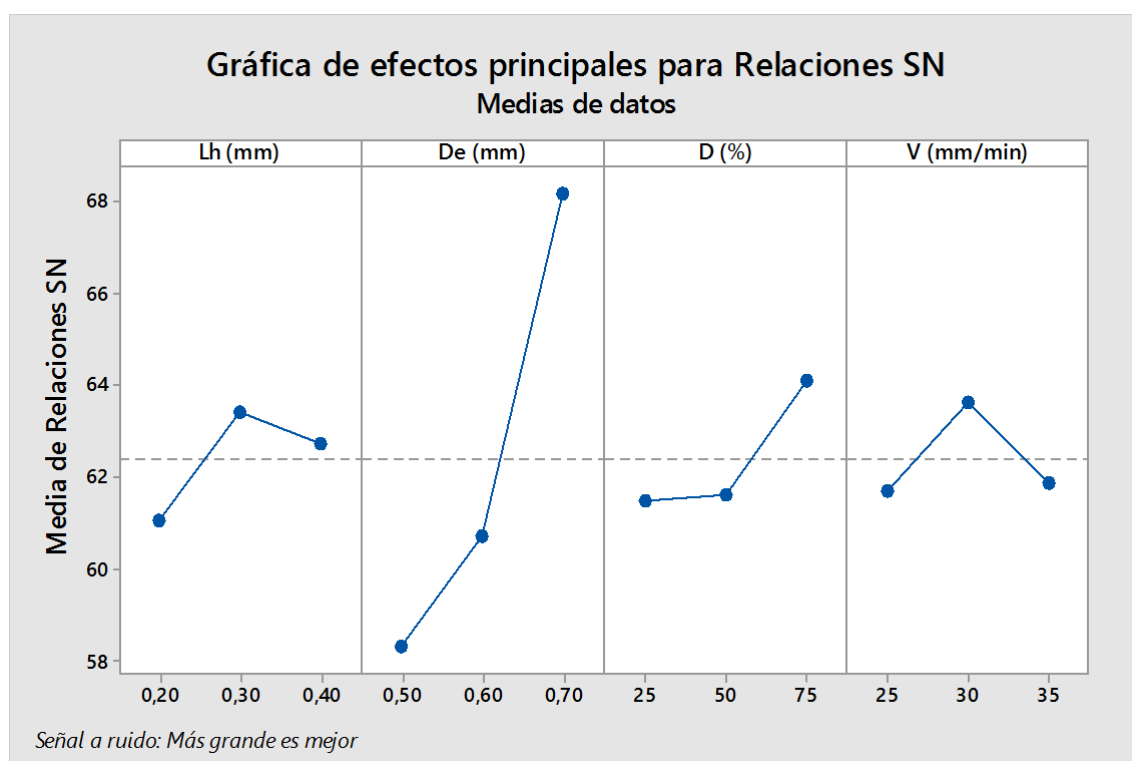
En la figura 24 es pot veure com interaccionen les dades entre sí. Es mostra com a més d'un cas els paràmetres interaccionen. Però observant els p-valors es veu com cap de les interaccions és estadísticament significativa. Per tant, és inútil treure conclusions de les interaccions entre paràmetres.

Això pot ser degut a que els valors no són molt robusts i per tant poden presentar certs errors que varien els resultats.

Taula 6. Valors dels p-valors donats pel programa *Minitab*.

Factor	P-valor
Alçada de capa * Diàmetre extrusor	0.431
Alçada de capa * Densitat d'emplenament	0.401
Diàmetre extrusor * Densitat d'emplenament	0.664

3.1.1.3 Efectes principals per a Relacions SN

**Figura 25.** Efectes principals per a Relacions SN.

En aquest apartat s'estudia la influència dels factors d'impressió utilitzats sobre les relacions SN, relacions senyal-soroll. Per tant, s'estudia la senyal de sortida tenint en compte els errors d'un mateix paràmetre. Les conclusions d'aquests gràfics informaran sobre si el material és més o menys robust. En aquest cas, que també s'estudia amb un nivell de significació del 10%, es tindrà en compte que si $p - valor < \alpha$, implica el paràmetre estudiat és molt robust.

En la figura 25 s'observa que el diàmetre de l'extrusor és el paràmetre més robust dels quatre estudiats, ja que mostra un increment de nivell molt notable. En canvi, els valors d'alçada de capa, la densitat d'emplenament i la velocitat no són factors molt robusts, cosa que implica que la fiabilitat d'aquests tres factors és molt baixa.

Encara que s'observen aquestes propietats als gràfics, es tornen a crear els p-valors de cada un dels paràmetres estudiats amb el mateix nivell de significació que anteriorment ($\alpha = 0.1$).

Taula 7. Valors dels p-valors donats pel programa Minitab.

Factor	P-valor
Alçada de capa	0.616
Diàmetre extrusor	0.014
Densitat d'emplenament	0.484
Velocitat	0.564

Aquests p-valors mostren que, una altre vegada, l'únic factor estadísticament significatiu és el diàmetre de l'extrusor, ja que $0.014 < \alpha$. En canvi, els altres tres paràmetres no mostren un nivell de significança suficient com per seleccionar-los com a factors robusts.

3.1.1.4 Interacció per a Relacions SN

Dos factors interaccionen quan l'efecte d'un depèn de l'efecte de l'altre.

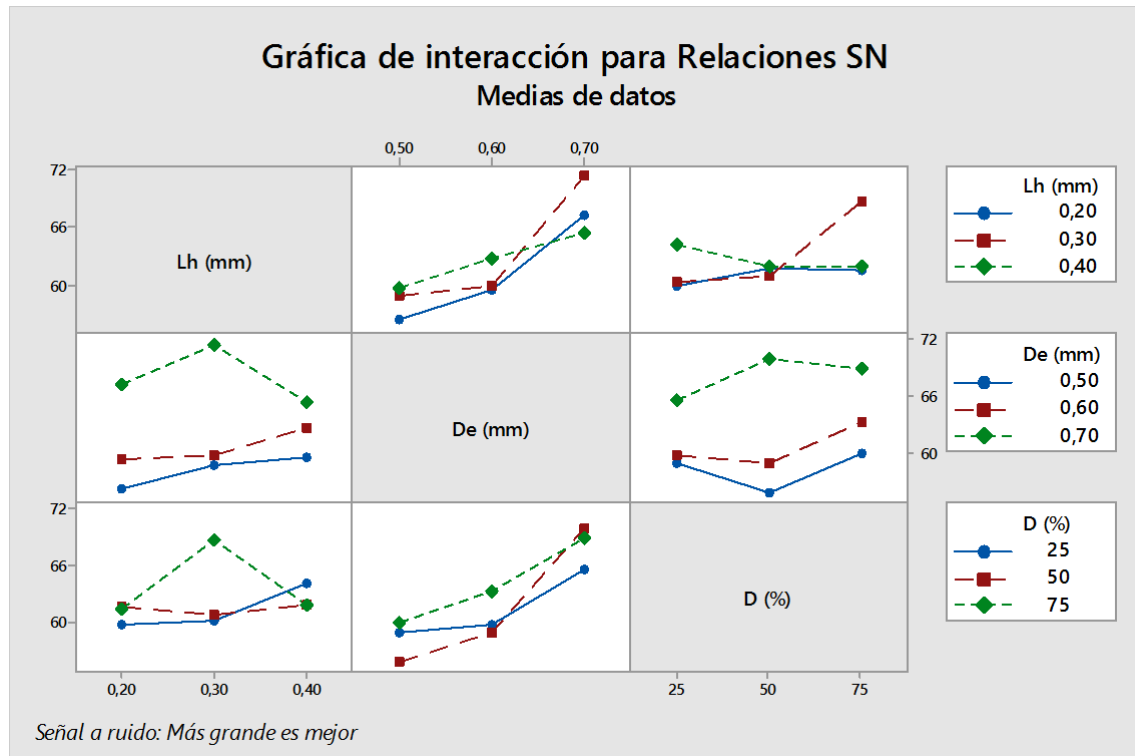


Figura 26. Interacció entre els valors per a Relacions SN.

Als gràfics de la figura 26 s'observen varies interaccions, però passa igual que al cas anterior. Quan es miren els p-valors s'observa que cap d'aquestes interaccions són estadísticament influents. I, de nou, no es pot arribar a cap conclusió fiable de les interaccions entre els paràmetres.

Taula 8. Valors dels p-valors donats pel programa Minitab.

Factor	P-valor
Alçada de capa * Diàmetre extrusor	0.618
Alçada de capa * Densitat d'emplenament	0.459
Diàmetre extrusor * Densitat d'emplenament	0.630

3.1.1.5 Residus per a mitjanes i per a Relacions SN

Les gràfiques de residu indiquen com de fiables son els resultats obtinguts anteriorment. Aquestes gràfiques es divideixen en quatre tipus diferents per tal d'analitzar els diversos errors o desviacions que hi pot haver durant l'estudi. És a dir, si els resultats compleixen les hipòtesis següents, l'estudi realitzat és un estudi fiable.

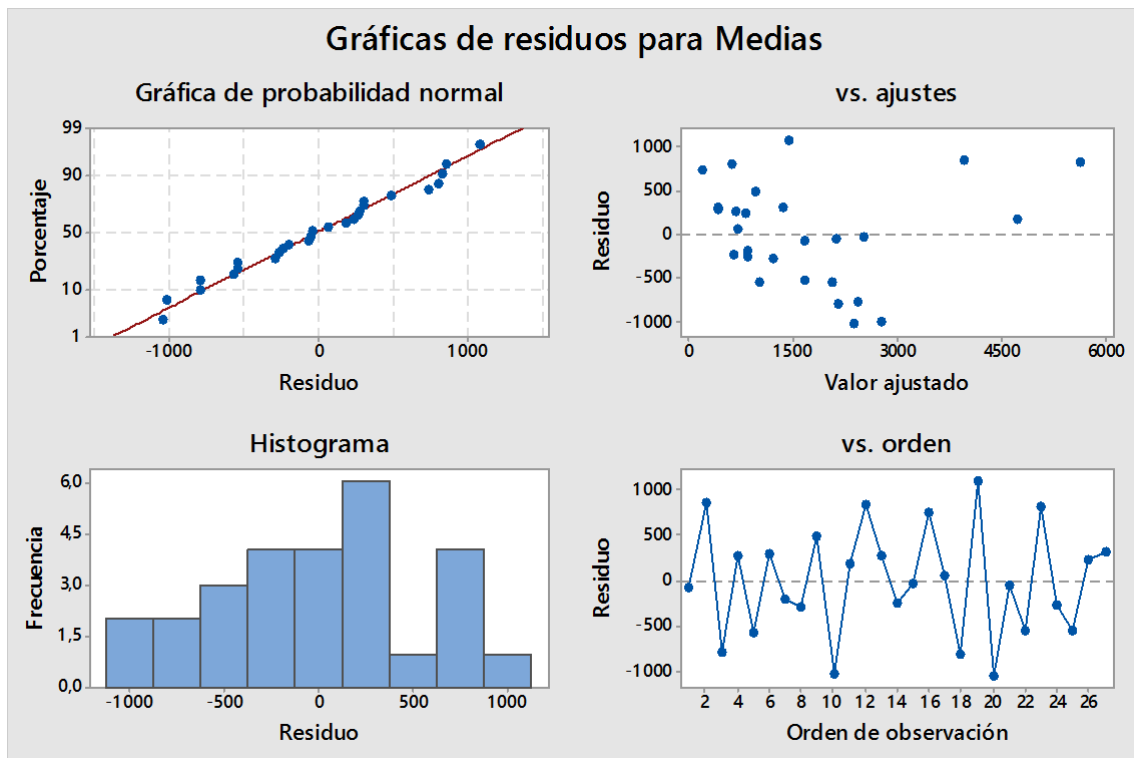


Figura 27. Gràfiques de residus per a mitjanes de nombre de cicles fins a la ruptura.

Els dos gràfics situades a l'esquerre de la figura 27, confirmen el supòsit de la normalitat ja que els punts de la gràfica de probabilitat normal s'ajusten a la línia de pendent 1 representada. L'histograma també confirma aquesta hipòtesi ja que la forma d'aquest gràfic és prou similar a la d'una distribució normal.

Els altres dos gràfics mostren que les hipòtesis son certes degut a la distribució que mostren els punts representats.

La figura 28 també confirma tampoc no hi ha cap evidència d'incompliment de les hipòtesis del model. Per tant, les gràfiques de residu demostren que els resultats dels estudis duts a terme en aquest projecte es consideren vàlids.

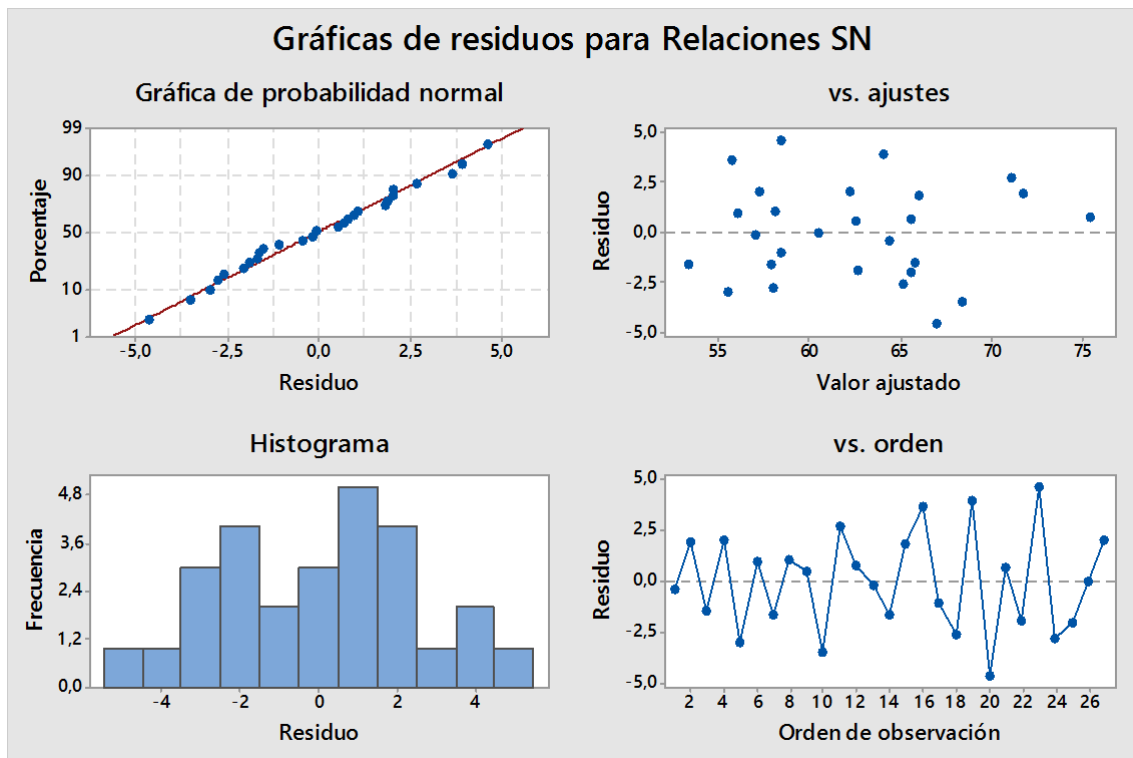


Figura 28. Gràfiques de residus per a Relacions SN de nombre de cicles fins a la ruptura.

3.1.2 Influència dels factors

Una vegada obtinguts els resultats d'influència de cada paràmetre sobre la vida de les provetes s'ha pogut observar que el diàmetre de l'extrusor és el paràmetre estadísticament més significatiu.

Sabent aquesta informació, s'ha dibuixat una gràfica representant el nombre de cicles de vida de cada mostra, diferenciant els tres diàmetres que s'han utilitzat per a la fabricació de les provetes. Així s'ha arribat a un gràfic molt visual, on s'observa que clarament la vida de les mostres fabricades amb diàmetre de l'extrusor de 0.7mm és molt més llarga que la resta de diàmetres. Aquest fet pot afectar a la influència dels altres factors. És a dir, si la influència del diàmetre de l'extrusor no fos tant elevada, segurament s'observaria una major influència dels altres tres.

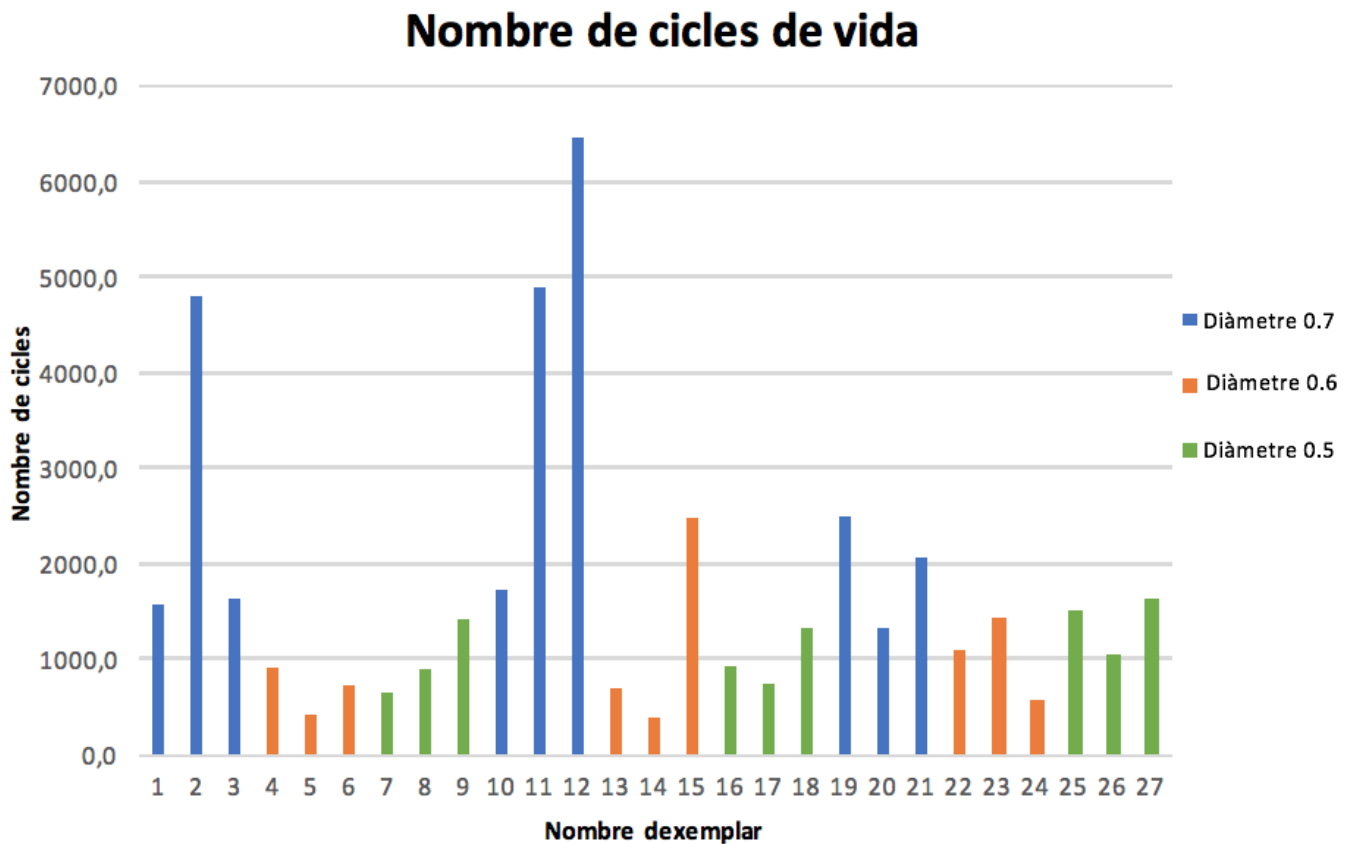


Figura 29. Gràfic nombre de cicles de vida, comparativa dels diferents diàmetres.

3.1.3 Màquina de fatiga

Hi ha dues formes de saber els cicles de vida d'una mostra assajada a la màquina GUNT WP 140. La primera és a partir d'un sensor i la segona és a partir del temps.

La màquina de fatiga consta de varis sensors. Dos d'ells relacionats amb la ruptura de la mostra. Un sensor compta els cicles de rotació que ha tingut la peça, l'altre fa que la màquina deixi de rotar una vegada la proveta s'ha romput. Per això, la màquina mostra el nombre de cicles que ha rotat la peça.

La segona forma, és amb el temps. Amb un cronòmetre es mira el temps total de l'assaig a fatiga. En aquest cas, és totalment manual, per això hi pot haver un error d'adquisició de dades.

Sabent que la màquina GUNT WP 140 gira a 2800rpm, multiplicant les revolucions per minut per el temps d'assaig, es troben els cicles de vida.

Per aquest projecte, s'han calculat el nombre de cicles de vida amb el temps i amb el sensor. I s'ha observat que, efectivament, existeix un error entre una mesura i l'altre, però que en la majoria de casos, el nombre de cicles calculats amb el sensor, és més gran que el nombre de cicles calculats amb el temps. Aquest resultat no era l'esperat ja que, per error d'adquisició del temps semblava que seria un nombre més gran.

Aquest error entre la manera de calcular el nombre de cicles, pot ser degut al motor de la màquina de fatiga. Si el motor no té un rendiment del 100%, el nombre de cicles que fa la mostra es veurà afectat. Aquest fet mostraria que, com es veu a la figura 30, l'error creix a mesura que el nombre de cicles creix.

Un altre possible error podria ser del sensor. Podria estar comptant malament degut a les vibracions de la màquina o per altres errors d'aquest.

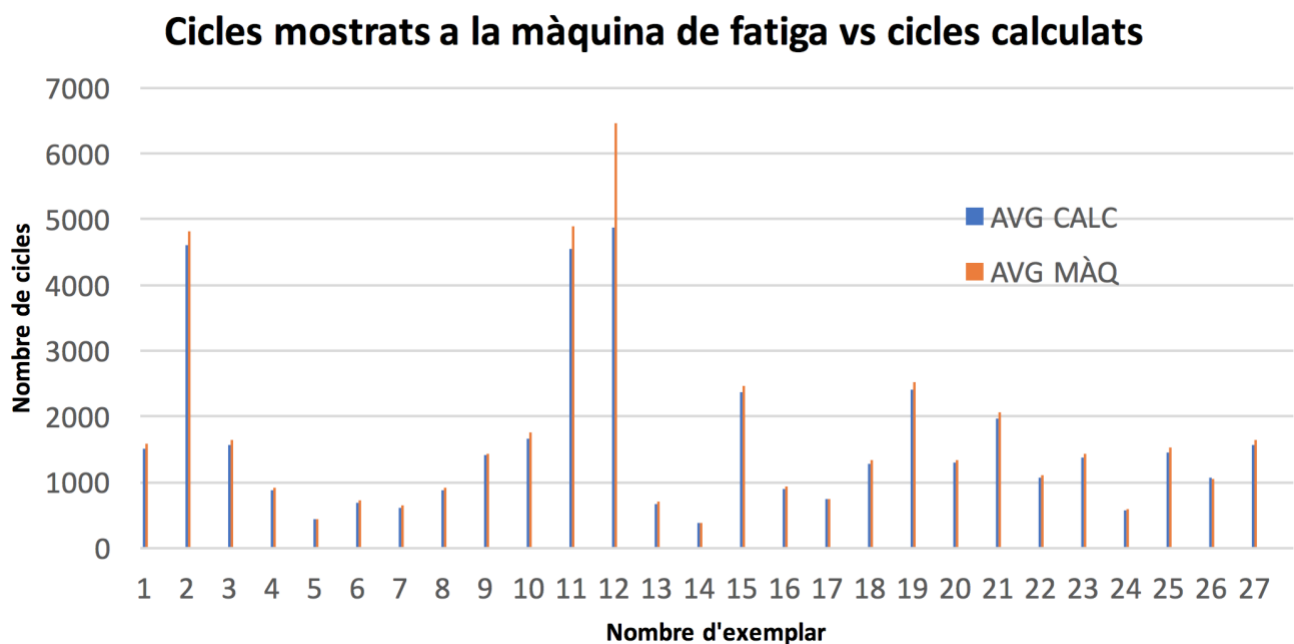


Figura 30. Diferència dels cicles calculats amb el sensor de la màquina i els cicles calculats amb el temps de duració de l'assaig.

Encara que hi hagi un cert error entre els cicles calculats amb el temps i els que compta el sensor, aquest error és entre un 1% i un 10%, que des del punt de vista d'enginyeria no és significant, ja que el resultat final no és veu molt afectat.

3.1.4 Assaig de fatiga a Spider

El software Catman presenta l'oportunitat de llegir la força exacte aplicada a la mostra sobre el gràfic de la figura 31 i de forma numèrica. En el gràfic es pot observar la representació de la força de fatiga amb Newtons respecte el temps. La representació permet veure com es comporta la força respecte el temps en tot moment durant l'assaig a fatiga, fins que romp.

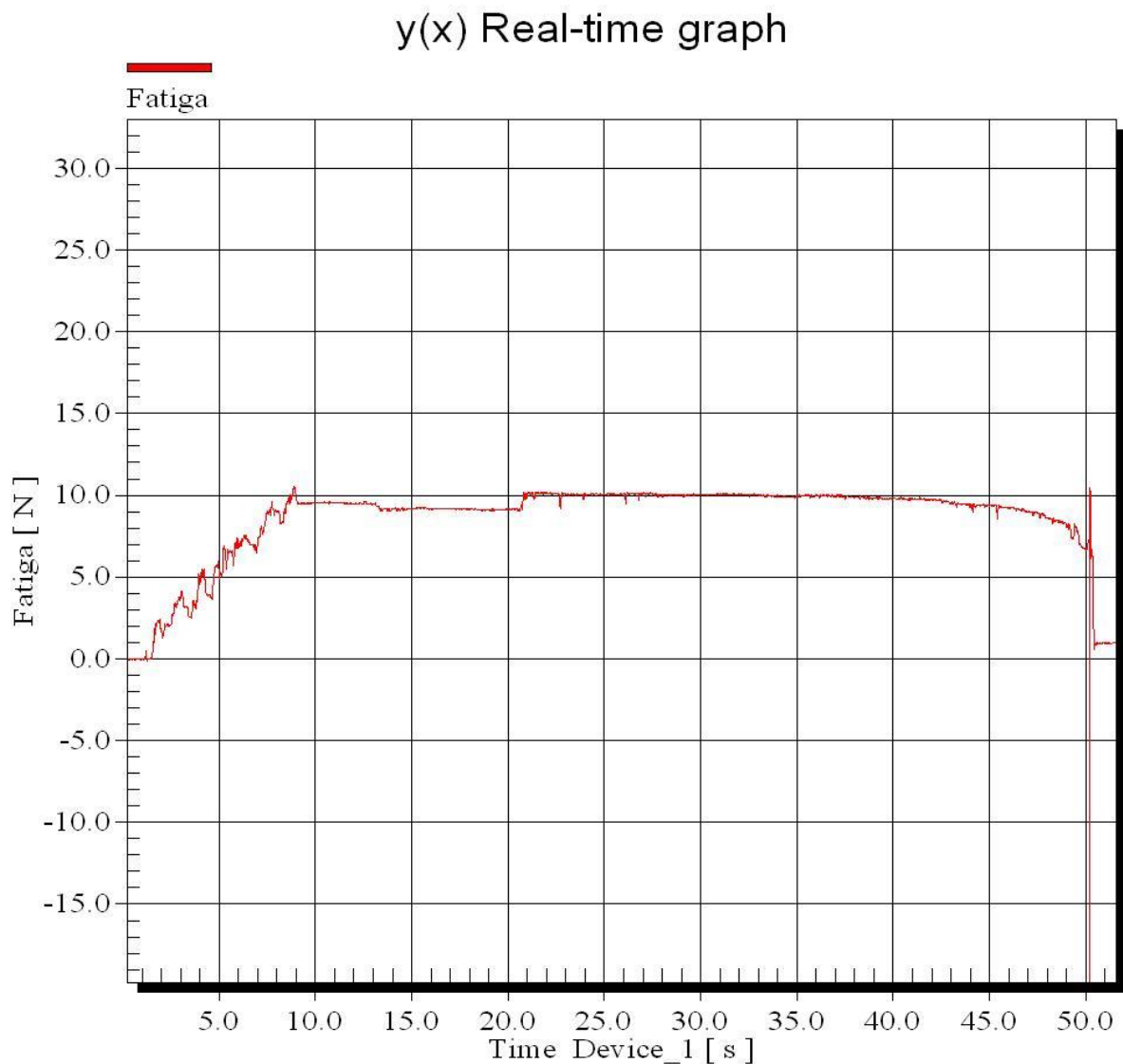


Figura 31. Gràfic exportat del programa Catman de l'experiment a fatiga.

El gràfic es pot dividir en tres parts. A la primera part s'observa com s'incrementa la força de 0 a 10N, que és la força aplicada sobre la proveta. Durant aquesta primera part la proveta encara està en repòs. Als 22 segons s'observa un canvi de força. Aquest canvi indica que la proveta comença a girar. La segona part és la part on la força és constant. Durant aquest temps la proveta suma cicles a la seva vida. I al final del gràfic, es distingeix la tercera part. S'observa que la força comença a disminuir. Això és un avís previ que la proveta fallarà, fins que aquesta es rompi, i per tant, es veu una gran diferència a la força.

3.2 QUANTITAT DE MATERIAL UTILITZAT

El material utilitzat a cada mostra depèn dels paràmetres d'impressió establerts. Per exemple, com més alta és la densitat d'emplenament, més material s'utilitzarà. Els valors de la quantitat de material que s'utilitzen per cada una de les diferents provetes es troben a la taula 9.

Taula 9. Material utilitzat per fabricar cada proveta.

Mostra	Material proveta (g)	Material suport (g)
1	11.22	0.73
2	11.38	0.73
3	11.47	0.73
4	9.98	0.87
5	10.47	0.87
6	10.79	0.87
7	10.62	1.09
8	10.78	1.08
9	10.98	1.08
10	11.22	0.74
11	11.38	0.75
12	11.47	0.75
13	10.02	0.87
14	10.48	0.86
15	10.8	0.87
16	10.64	1.04
17	10.78	1.03
18	10.96	1.04
19	11.24	0.82
20	11.40	0.81
21	11.48	0.81
22	10.40	0.84
23	10.79	0.84
24	10.97	0.84

25	10.87	1.00
26	10.99	1.01
27	11.13	1.01

Aquests valors es poden comparar amb els nombres de cicles de vida que han tingut les provetes, per així trobar una correlació entre sí. A la figura 32, es troba un gràfic comparant aquests dos factors.

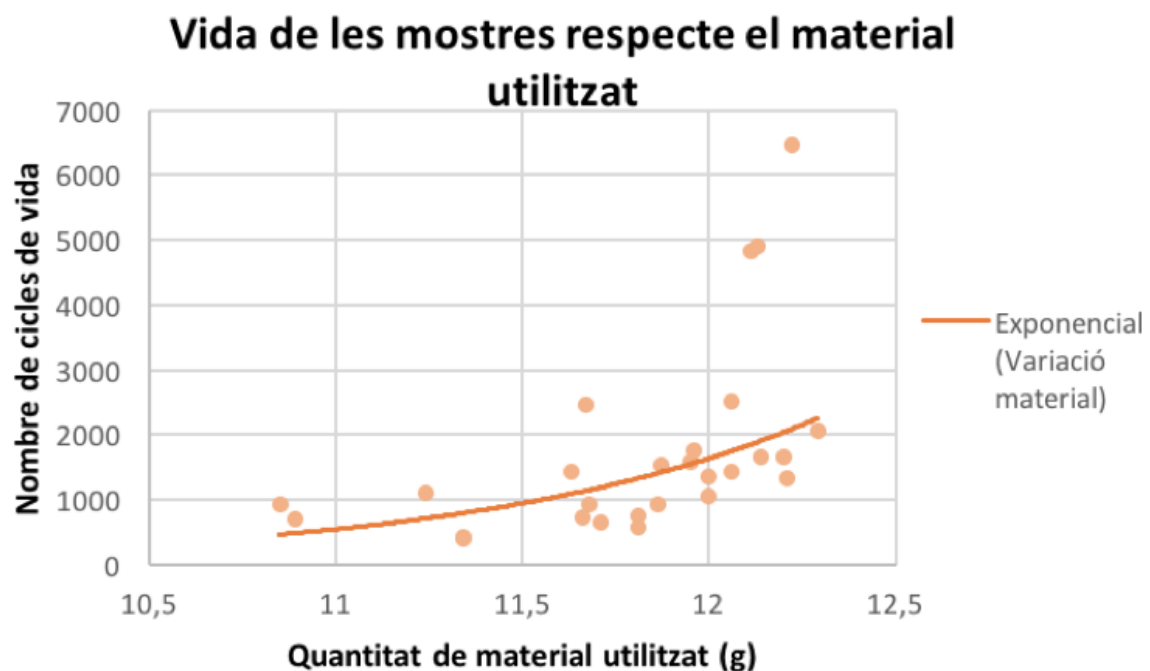


Figura 32. Gràfic relacionant la vida de les mostres amb la quantitat de material utilitzada per la impressió de les mostres.

Per tant, a la figura 32, s'observa que els nombres de cicles de vida es relacionen amb una línia de tendència exponencial respecte la quantitat de material utilitzat. Com més material tenen les mostres, més llarga és la seva vida. Això és degut a que, com més material existeix, més forces es poden suportar ja que hi ha material en totes les direccions de les forces. És per això que es poden observar aquests resultats.

3.2.1 Estudi estadístic de la influència dels paràmetres

Per ser més precisos, es pot fer un estudi amb Taguchi per veure com influeix cada paràmetre dels que s'han variat, a la quantitat de material, i per tant, a allargar la vida de les mostres.

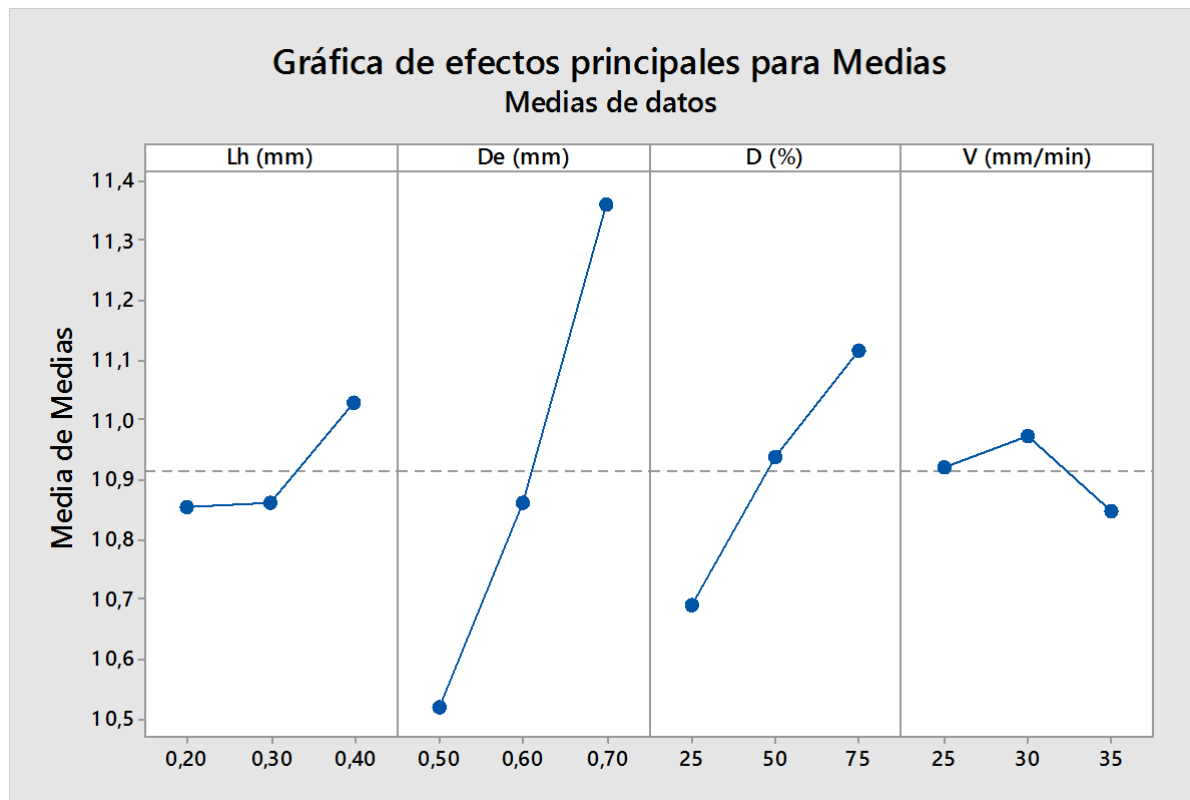


Figura 33. Efectes principals per mitjanes del material utilitzat.

Dels quatre paràmetres que s'estudien, a la figura 33 s'observa que el diàmetre de l'extrusor és un factor que influeix sobre la quantitat de material utilitzat. Aquest resultat és raonable ja que un diàmetre gran deixa sortir més material que un diàmetre més petit.

Els altres tres valors, l'alçada de capa, la densitat i la velocitat, semblen ser menys influents, encara que l'alçada de capa i la densitat d'emplenament ho són més que la velocitat.

Per a obtenir un resultat analític es consideren els p-valors, que s'han adjuntat a la taula 10.

Taula 10. Valors dels p-valors donats pel programa Minitab.

Factor	P-valor
Alçada de capa	0.000
Diàmetre extrusor	0.000
Densitat d'emplenament	0.000
Velocitat	0.146

Els p-valors demostren que l'alçada de capa, el diàmetre de l'extrusor i la densitat d'emplenament són estadísticament molt significatius adquirint un valor de 0, per tant, compleix la restricció de $p - \text{valor} < \alpha$. La velocitat no es considera estadísticament significativa ja que $0.146 > \alpha$.

3.2.2 Diferència entre el pes previst i el pes mesurat

Taula 11. Valors del pes de les provetes previst pel programa Simplify3D, el pes real de les provetes i l'error entre els dos valors.

Mostra	Pes Simplify3D (g)	Pes real (g)	Error (%)
1	11.22	9.26	17.47
2	11.38	9.62	15.47
3	11.47	9.50	17.18
4	9.98	9.65	3.31
5	10.47	9.31	11.08
6	10.79	10.42	3.43
7	10.62	9.50	10.55
8	10.78	9.97	7.51
9	10.98	10.22	6.92
10	11.22	9.63	14.17
11	11.38	9.80	13.88
12	11.47	9.97	13.08
13	10.02	9.44	5.79

14	10.48	9.58	8.59
15	10.80	10.22	5.37
16	10.64	9.32	12.41
17	10.78	9.63	10.67
18	10.96	10.12	7.66
19	11.24	9.82	12.63
20	11.40	9.98	12.46
21	11.48	10.03	12.63
22	10.40	9.80	5.77
23	10.79	10.11	6.30
24	10.97	9.72	11.39
25	10.87	9.84	9.48
26	10.99	9.84	10.46
27	11.13	10.03	9.88

S'ha observat una diferència entre el material necessari teòric i pràctic. És a dir, el que indica provisionalment el programa *Simplify3D* i el que realment es necessita. A la següent gràfica es pot veure com varien els valors entre el que realment pesen les mostres i el que preveu el software. Els valors d'aquesta diferència de pesos s'ha adjuntat a la taula 11.

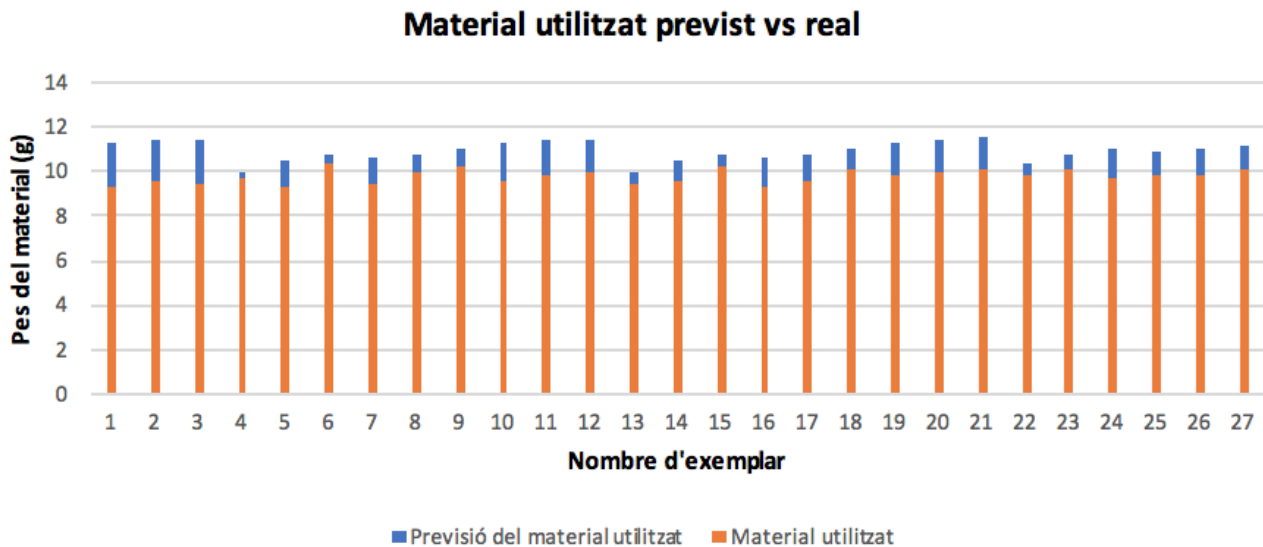


Figura 34. Comparació del pes de material previst pel programa de Simplify3D respecte el pes real de les peces finals.

Un cert percentatge d'error és degut a que el pes de les provetes s'ha anotat una vegada han estat provades. I abans de ser provades es varen polir ja que no encaixaven bé a la màquina de fatiga, degut als errors de precisió de la impressora utilitzada. Però l'error degut al polit no és tant gran com el que es veu al gràfic.

Com a observació, la taula 11 hi ha els grams de materials necessaris per imprimir una proveta de cada tipus. Però s'han imprès 5 provetes de cada factor, això implica que el material total utilitzat és de 1593g. Apart d'aquestes provetes també se n'han fabricades 20 més a fi de dibuixar la corba de Wöhler, que si es sumen al pes anterior, s'obtenen 1837g. I també s'ha de tenir en compte que per diversos tipus de problemes a l'hora d'imprimir, com ja s'han anomenat anteriorment, han causat una pèrdua de material d'aproximadament 200g. És a dir, al final, per a dur a terme aquest projecte han estat necessaris aproximadament 2kg de *Timberfill*.

3.3 COST DE PRODUCCIÓ I EXECUCIÓ

El cost de producció del projecte és la suma de diferents costs. D'entre tots els que hi ha només es tindran en compte el cost d'electricitat per imprimir, el cost d'electricitat per fer els assajos a fatiga i el cost del material. Els costs que implica la maquinaria utilitzada, o els treballadors, o qualsevol altre cost no es tindran en compte.

El cost total de cada una de les provetes fabricades i assajades es calcularà segons la següent funció:

$$Cost = Cost\ material + Cost\ impressió + Cost\ fatiga \quad (1)$$

On cada cost segueix la següent funció:

$$Cost\ material = Preu\ material * Pes\ material\ utilitzat \quad (2)$$

$$Cost\ impressió = Potència\ impressora * Temps\ impressió * Preu\ electricitat \quad (3)$$

$$Cost\ fatiga = Potència\ màquina\ fatiga * Temps\ assaig * Preu\ electricitat \quad (4)$$

S'utilitzaran les dades de la taula 12 per a calcular el cost final.

Taula 12. Paràmetres invariables utilitzats al càlcul de cost.

Paràmetres invariables	Valor
€/kWh electricitat	0,12197
€/g Timberfill	0,059
kWh màquines	6,1

S'ha suposat una aproximació de les potències utilitzades per les màquines segons estudis realitzats anteriorment [16], i per les dues màquines s'utilitzarà la mateixa potència, encara que realment no tenen un valor igual però s'obtindrà un valor aproximat. Fer aquesta

aproximació no és una gran variació en quant al cost final ja que el material és el paràmetre més influent amb diferència respecte als costos finals, com s'observarà als resultats.

Taula 13. Paràmetres de càlcul del cost amb el valor del cost de fabricació i assaig de cada mostra.

Nombre de la mostra	Temps impressió (h)	Pes material (g)	Mitjana cicles de vida	Temps assaig a fatiga (min)	Cost (€)
1	0,77	11,95	1580,40	0,56	1,28
2	0,65	12,11	4819,40	1,72	1,22
3	0,57	12,20	1648,00	0,59	1,15
4	0,68	10,85	919,33	0,33	1,15
5	0,82	11,34	428,20	0,15	1,28
6	1,00	11,66	716,60	0,26	1,44
7	0,63	11,71	654,00	0,23	1,16
8	0,88	11,86	913,25	0,33	1,36
9	0,75	12,06	1432,33	0,51	1,28
10	0,43	11,96	1751,40	0,63	1,04
11	0,38	12,13	4897,40	1,75	1,02
12	0,52	12,22	6456,25	2,31	1,13
13	0,47	10,89	698,80	0,25	0,99
14	0,65	11,34	387,20	0,14	1,15
15	0,57	11,67	2467,17	0,88	1,12
16	0,58	11,68	935,40	0,33	1,13
17	0,50	11,81	746,20	0,27	1,07
18	0,43	12,00	1342,60	0,48	1,04
19	0,28	12,06	2518,20	0,90	0,93
20	0,40	12,21	1327,15	0,47	1,02
21	0,33	12,29	2067,15	0,74	0,98
22	0,50	11,24	1103,00	0,39	1,04
23	0,43	11,63	1427,20	0,51	1,01
24	0,37	11,81	582,00	0,21	0,97
25	0,38	11,87	1518,50	0,54	0,99
26	0,33	12,00	1054,00	0,38	0,96

27	0,45	12,14	1646,00	0,59	1,06
----	------	-------	---------	------	------

Tenint en compte que de cada tipus de mostra se'n fabriquen cinc, el cost de les mostres seria de 150€. Si es suma el cost de material i electricitat de impressió del material imprès i gastat queda un cost total de 165€ aproximats.

3.3.1 Estudi estadístic de la influència dels paràmetres

Si també s'utilitza el programa *Minitab* per a saber la influència dels paràmetres en el cost calculat, amb l'estadística de Taguchi, es troben els gràfics de la figura 35.

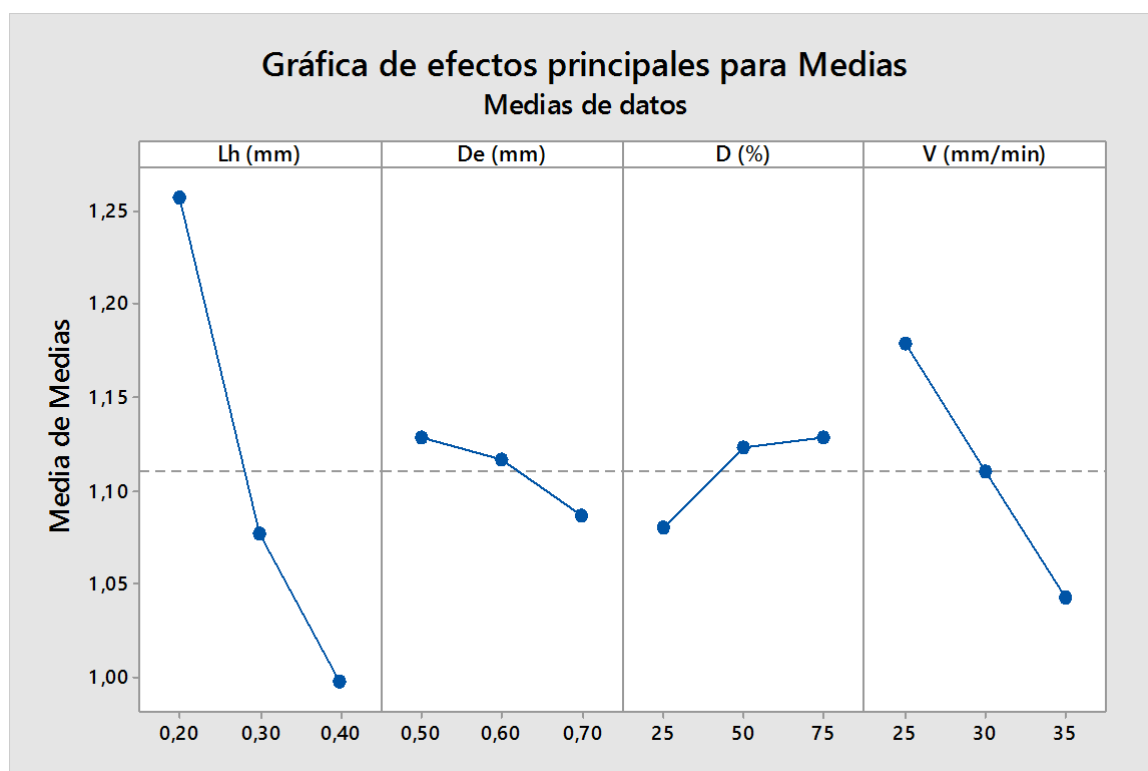


Figura 35. Efectes principals per mitjanes del cost.

Als gràfics de la figura 35 sembla que l'alçada de capa i la velocitat són els factors més influents. Mirant als valors del p-valor es veu que tots són influents ja que tots els paràmetres tenen valors més petits que $\alpha=0.1$.

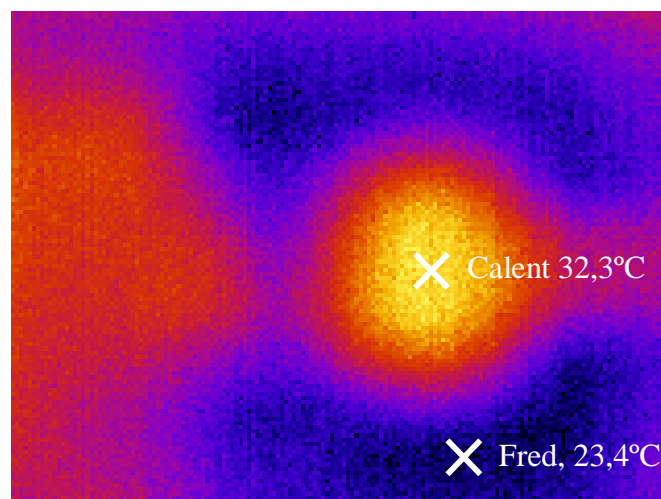
Taula 14. Valors dels p-valors donats pel programa Minitab.

Factor	P-valor
Alçada de capa	0.000
Diàmetre extrusor	0.032
Densitat d'emplenament	0.029
Velocitat	0.000

3.4 TEMPERATURA DE RUPTURA

Quan una mostra romp, es pot observar una diferència de calor entre el punt on romprà i la resta de mostra. Aquest increment de calor és degut a una concentració de tensions, que causa que la proveta falli.

Amb la càmera tèrmica es pot observar perfectament on hi ha l'excés de calor, per tant, s'observa una diferència de temperatura entre el lloc de ruptura respecte la resta de la proveta. Aquesta diferència de calor es pot observar a la **figura 36**.

**Figura 36.** Imatge de la temperatura de ruptura.

S'ha observat l'increment de calor a les mostres provades amb diàmetre de 0.7mm, i els resultats es troben a la taula 15.

Taula 15. Temperatura de ruptura a fatiga.

Mostra	Mitjana de cicles	Temperatura de ruptura
1	1580.4	28.5
2	4819.4	30.8
3	1648.0	31.9
10	1751.4	29.9
11	4897.4	31.6
12	6456.3	32.3
19	2518.2	31.7
20	1327.2	31.8
21	2067.2	31.3

A partir d'aquests resultats queda demostrat que la temperatura d'una mostra a una altre no varia de manera important. Encara que si es representen els valors de la taula 15 gràficament, es pot veure que la vida de cada mostra té una correlació exponencial amb la temperatura de ruptura. S'observa, per tant, que com més cicles té una mostra, més alta és la temperatura de ruptura.

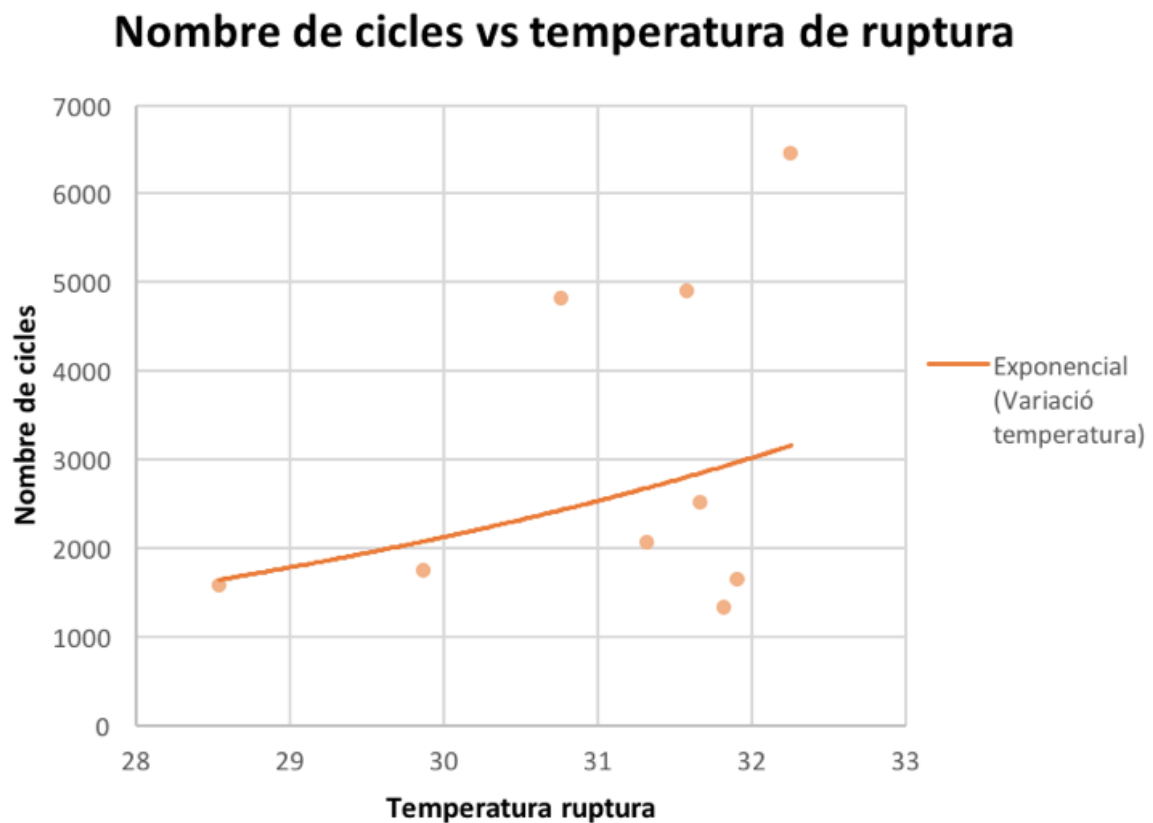


Figura 37. Gràfic relacionant la temperatura de ruptura amb la vida de les mostres.

Encara que al gràfic es pot apreciar una relació entre la temperatura i el nombre de cicles, el valor de la temperatura es pot considerar constant per al *Timberfill*.

3.4.1 Estudi estadístic de la influència dels paràmetres

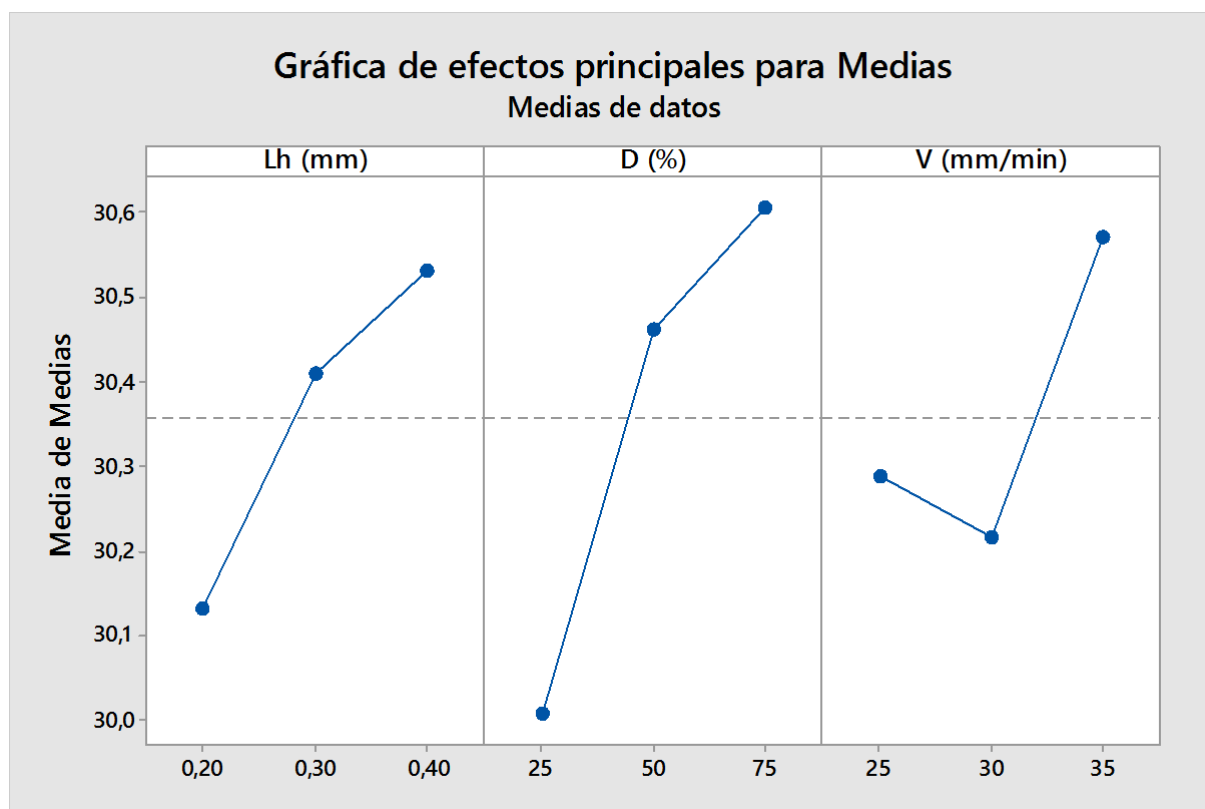


Figura 38. Efectes principals per mitjanes de la temperatura de ruptura.

La temperatura només s'ha estudiat per a un cert valor de diàmetre d'extrusor. Per aquest motiu per fer l'estudi estadístic no s'ha tingut en compte el valor del diàmetre.

Als resultats gràfics s'observa que la densitat d'emplenament és lleugerament més significativa que l'alçada de capa i la velocitat, però no es pot demostrar només gràficament si cap d'aquests paràmetres són estadísticament significatius per a la temperatura de ruptura. Per aquest motiu, s'obtenen els p-valors.

Taula 16. Valors dels p-valors donats pel programa Minitab.

Factor

P-valor

Alçada de capa	0.636
Densitat d'emplenament	0.268
Velocitat	0.419

A partir dels p-valors es veu que no hi ha cap factor estadísticament significatiu per a la temperatura ja que cap compleix que el seu valor sigui més petit que α . Això pot ser degut a que la temperatura es pot considerar constant.

3.5 ANÀLISIS DE LA VIDA A FATIGA EN CONDICIONS ÒPTIMES

A fi d'avaluar la vida a fatiga en condicions òptimes es necessita introduir totes les dades a un diagrama de Wöhler. El diagrama de Wöhler és específic per a cada material amb els seus paràmetres concrets d'impressió. Per això és necessari construir el diagrama de Wöhler específic de la millor proveta.

Per assegurar que es troben els valors suficients per dibuixar la gràfica es necessita trobar un valor de força on la vida de les mostres és infinita i un valor de força que faci que la mostra rompi aviat. Com més forces diferents s'apliquin, més precisa serà la corba, i com a mínim es necessiten tenir sis valors de força diferent. Les forces aplicades es troben a la taula 18.

Es seguirà el procés de construcció de la gràfica de la corba de Wöhler dut a terme en estudis anteriors [7]. Per tant, es seguiran els següents passos:

$$y = A + Bx \quad (5)$$

Els valors estimats de A i B es calculen amb les equacions (6) i (7).

$$A = \bar{y} + B\bar{x} \quad (6)$$

$$B = \frac{\sum_{i=1}^{n_s} (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^{n_s} (x_i - \bar{x})^2} \quad (7)$$

On n_s és el nombre de provetes assajades i \bar{y} , \bar{x} són les mitjanes dels valors de x i y.

La fórmula de Wöhler (S-N) en forma logarítmica és la equació (8).

$$\log(2N_f) = -\frac{1}{b} \log(S_f) + \frac{1}{b} \log(S_a) \quad (8)$$

S'observa que les equacions (5) i (8) tenen la mateixa forma, es poden comparar entre sí:

y	A	B	x
\updownarrow	\updownarrow	\updownarrow	\updownarrow
$\log(2N_f)$	$-\frac{1}{b} \log(S_f)$	$\frac{1}{b}$	$\log(S_a)$

Per tant, es pot reescriure l'equació de la corba de Wöhler tal com mostra l'equació (9)

$$S_a = S_f (2N_f)^b \quad (9)$$

Al diagrama de Wöhler és necessari introduir els valors de la força en forma de tensió. Per a convertir les forces aplicades en tensió s'utilitza la fórmula (10).

$$S_f = \frac{Kt \cdot Mf \cdot \frac{Deq}{2}}{Ix} \quad (10)$$

Aplicant les equacions presentades anteriorment, tenint en compte les dades mostrades a la taula 17, s'obtenen els valors de la taula 18.

Taula 17. Dades constants per a tota la corba de Wöhler.

Característiques provetes

Àrea massissa (mm^2)	53,75
Àrea resistent (mm^2)	42,36
Deq (mm)	7,34
Ix (mm^4)	142,79
Voladís provetes (mm)	104
Kt	1,34

S'obtenen diferents àrees ja que la massissa és tenint en compte una densitat d'emplenament del 100%. Com que la proveta estudiada té un 75% d'emplenament, es calcula l'àrea resistent. A partir d'aquesta àrea es troba el diàmetre equivalent i a partir d'aquestes dades es calcula la inèrcia. El Kt és degut al concentrador de tensions i per a la proveta estudiada és de 1.34, com mostra la taula 17.

A partir d'aquests valors es poden passar les forces a tensions, que són les necessàries a fi de poder representar la corba de Wöhler.

Taula 18. Valors utilitzats per construir la corba de Wöhler.

Força (N)	Moment màxim (N·mm)	Tensió màxima (MPa)
5	520	17.9
7	728	25.1
8.5	884	30.5
10	1040	35.8
11.5	1196	41.2
13	1352	46.6

A la figura 39 s'observa la corba de Wöhler del *Timberfill*. Aquest gràfic representa la vida infinita de les provetes. Per tant, des del moment que les provetes tenen un nombre de cicles més gran del que mostra el gràfic, es consideraria la vida infinita.

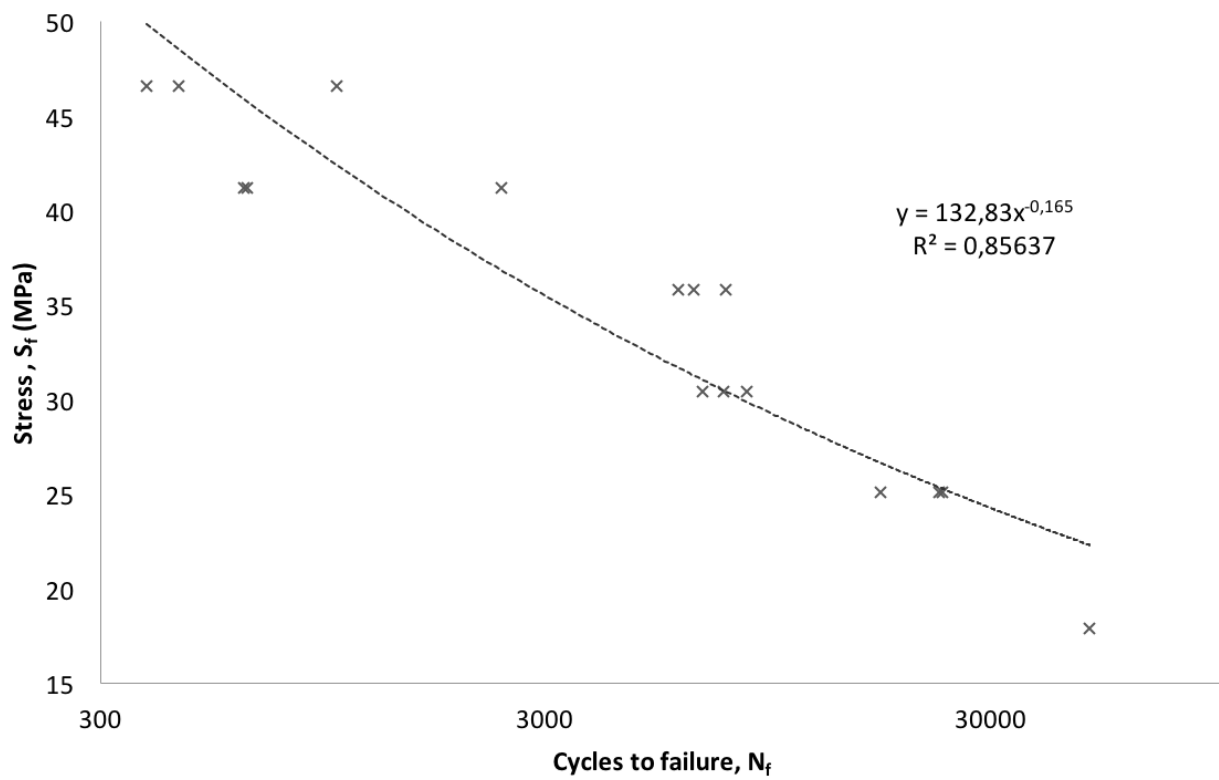


Figura 39. Diagrama de Wöhler de Timberfill.

4. DISCUSSIÓ DELS RESULTATS

4.1 RESISTÈNCIA A LA FATIGA

A partir dels resultats obtinguts de l'assaig a fatiga es pot demostrar que els factors que s'han tingut en compte com a influents, han estat factors significatius.

Totes les mostres assajades ha estat impreses orientades respecte l'eix X i amb el patró d'emplenament *Honeycomb* ja que són dos paràmetres que anteriorment han mostrat millors condicions. Per tant, tota la discussió dels resultats es farà només per a aquesta orientació i aquest emplenament concret. Els quatre paràmetres que s'han variat són l'alçada de capa, el diàmetre d'extrusor, la densitat d'emplenament i la velocitat d'impressió. D'aquests quatre factors s'ha demostrat que el factor que té més significació estadística és el diàmetre de l'extrusor.

El paràmetre diàmetre de l'extrusor ha estat el factor més significatiu ja que, com més petit és el diàmetre, més aviat rompien les provetes, i a mesura que aquest anava incrementat de valor, el nombre de cicles de vida també augmentaven. Que el diàmetre de l'extrusor sigui tant significatiu pot ser degut a dos motius:

- Un dels motius està relacionat amb la quantitat de material, amb la temperatura i, a conseqüència, la unió entre filaments.
Que s'imprimeixi més material, fa que la temperatura a que el material és imprès es mantingui al valor original més temps. Això permet que, a la propera capa de material dipositada, es puguin crear les forces entre capes i entre filaments que fan obtenir una major força d'unió i per tant, proporcionen una vida més llarga a les provetes. Per tant, s'observa que hi ha una relació directament proporcional entre el diàmetre i la vida a fatiga.
- L'altre motiu és que les provetes, utilitzant un diàmetre gran, es mostren més compactes. Aquest fet es pot observar just en el moment d'impressió, el resultat, visualment, se'l veu més compacte, i això també es degut al que es comentava anteriorment.

Tots aquests efectes, fortament relacionats entre sí, fan que els resultats siguin els obtinguts i que el diàmetre d'impressió sigui tant significatiu per al *Timberfill*.

El fet de que el diàmetre sigui tant més influent que els altres paràmetres fa que els resultats mostrin que els altres paràmetres no siguin gaire influents. Per tant, encara que aquests paràmetres no siguin estadísticament influents en aquest estudi, es podria trobar una relació d'influència i decidir com influeixen.

El cas de la velocitat d'impressió és contrari al cas del diàmetre de l'extrusor, ja que la velocitat ha demostrat que no té gairebé gens influència estadística sobre el resultat dels assajos a fatiga. Aquest resultat es podria discutir ja que, en principi, com menor és la velocitat d'impressió, menys defectes té el resultat i més perfecte és la fabricació de les peces. Contràriament, sembla que com més alta és la velocitat d'impressió més ràpid es diposita una capa sobre l'altre i la temperatura encara seria suficientment alta com per formar enllaços entre capes. Per tant, si es fes un estudi més concret de la velocitat potser es trobarien altres resultats on la velocitat és més influent. És més, els resultats obtinguts sobre la velocitat poden tenir un cert error ja que la velocitat, a partir de l'estudi de relació SN, ha mostrat ser un paràmetre molt poc robust.

En canvi, la densitat d'emplenament, ha estat un paràmetre que ha estat menys influent del que s'esperava. Això ha demostrat que no hi ha una relació significativa entre la quantitat de material i la vida de les mostres. Però, com s'ha comentat abans, segurament es mostraria una influència més alta d'aquest paràmetre si existís una relació tant forta entre el diàmetre i la vida.

Finalment, l'alçada de capa és un factor que s'ha mostrat més pròxim al nivell de significació de 0,1 encara que també hi està massa allunyat com per assegurar que és un factor estadísticament significatiu. Però és necessari exposar que entre l'alçada de capa i el diàmetre de l'extrusor hi ha una relació considerable. Sabent que el diàmetre fa que un filament sigui més o menys gruixat i que l'alçada de capa fa els filaments més alts, s'observa una relació d'excentricitat. Aquest efecte es relaciona amb les forces creades entre capes. Perquè una capa s'adhereixi bé a una altre capa és necessari aconseguir la major superfície de contacte possible. Això s'aconsegueix fent que els filaments no tinguin forma de cilindre, sinó que siguin més aplanats. Per tant, és recomanable que el diàmetre sigui més gran que l'alçada de capa. A la figura 40 es pot observar aquest efecte. Veient que com més semblant és l'alçada de capa al diàmetre, menys cicles de vida té una mostra. S'ha de tenir en compte que la relació s'ha de mantenir també de cap a l'altre extrem. Que l'alçada de capa sigui molt més petita que el diàmetre tampoc mostra molt bons resultats. Per això s'ha de trobar el punt entremig.

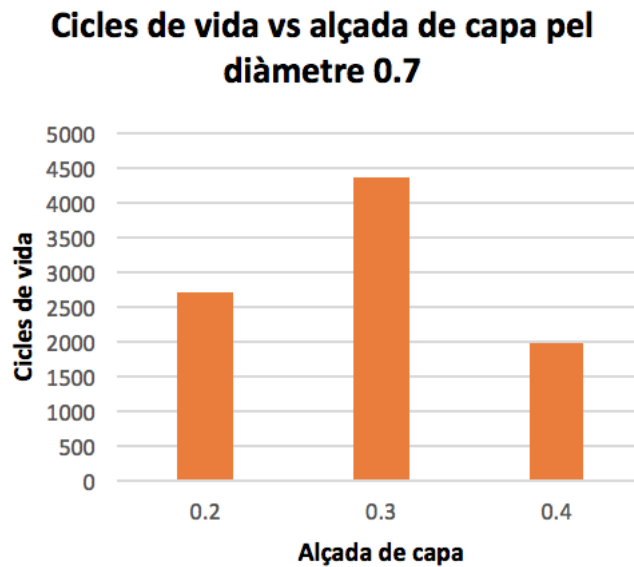


Figura 40. Efecte de l'alçada de capa sobre la vida de les mostres aplicat al diàmetre de 0.7

Per tant, quan el *Timberfill* romp per ruptura fràgil als assajos de fatiga, el diàmetre té un gran efecte sobre la vida que aquest material tindrà una vegada hagi estat fabricat.

4.2 QUANTITAT DE MATERIAL UTILITZAT

Gràcies a l'estudi estadístic de Taguchi s'han pogut trobar els paràmetres que afecten a la quantitat de material necessari per a imprimir les provetes. Els resultats mostren que hi ha tres paràmetres que hi influeixen per igual. Aquests paràmetres són l'alçada de capa, el diàmetre de l'extrusor i la densitat d'emplenament.

El paràmetre que menys sorprèn com a influent és el de densitat d'emplenament, ja que aquesta densitat informa de la quantitat de material sobre la quantitat d'espai buit té una peça. Per tant, quan hi ha una densitat del 100% implica que no hi ha espais buits a la mostra, només hi ha material. En canvi, si és un 0% implica que la mostra està buida interiorment, només disposa de les capes exteriors.

L'efecte tant significatiu de l'alçada de capa i del diàmetre pot ser degut a que per la impressió de les mostres s'ha deixat el valor predeterminat de capes exteriors, i aquest valor és cinc. A conseqüència, això pot causar que la influència de la densitat d'emplenament estigui al mateix nivell que els altres dos paràmetres, i per tant, s'observen els tres significatius.

Que una mostra necessiti menys material per fabricar-se implica avantatges però també té inconvenients. Una avantatge és el cost de producció. Si es necessita menys material s'estalvia en aquest aspecte, que si només es fabriquen unes quantes mostres potser no és un valor molt alt, però si es pretén imprimir moltes mostres el valor passaria a ser notable. D'altra banda, s'ha de tenir en compte que les propietats de les provetes poden baixar amb el material, com s'ha mostrat a la figura 40.

Seria ideal trobar el punt entremig entre l'optimització del material però tenint les millors propietats mecàniques possibles. Depenent de la funció de les provetes fabricades es necessitarien unes propietats més elevades o serien suficients amb un valor no tant alt.

4.3 COST DE PRODUCCIÓ I EXECUCIÓ

Per a analitzar el cost de producció el primer que s'observa és que el material és el que més influeix al cost total. Es poden veure els percentatges d'influència de cada tipus de cost a la taula 19.

Taula 19. Influència en forma de percentatge dels costs.

Costs	Valor (%)
Cost Material	62.7
Cost Impressió	0.7
Cost assajos	36.6

Per tant, encara que s'hagi utilitzat uns dels patrons més complexos, com és *Honeycomb*, i aquest utilitzi més temps d'impressió, el cost no augmenta notablement ja que el cost d'impressió implica un baix canvi perquè té un 0.7% d'influència sobre el resultat final.

En quant a la influència sobre els costs dels paràmetres variats a la impressió no es pot arribar a cap conclusió ja que tots mostren tenir influència estadística sobre el cost final. Això pot ser degut als errors que es creen al ser tant poc robusts els paràmetres.

El cost de producció i execució incrementaria notablement si es tingués en compte el personal que treballa a aquest projecte i a la inversió de maquinària que implica fer tots aquests experiments. També s'hauria de tenir en compte l'establiment on es porta a terme el projecte i l'electricitat utilitzada en aquest establiment que no implica directament la maquinària utilitzada. Però pel que fa als costs tinguts en compte en aquest projecte, el material és el que aporta més al cost final.

4.4 TEMPERATURA DE RUPTURA

La ruptura d'un objecte és deguda a un concentrador de tensions que, en el cas de les provetes provades a fatiga, aquest concentrador de tensions és causat per el canvi de diàmetre que presenten les provetes. Un concentrador de tensions, normalment, abans de rompre crea un increment de temperatura a la secció per on romprà. Per això s'ha pogut estudiar la temperatura que tenia la secció crítica de les provetes.

Depenent del material aquesta temperatura creada afectarà a que el material falli abans del previst, però en el cas del *Timberfill*, la temperatura no és un factor a tenir en compte ja que s'ha mostrat constant a totes les provetes que s'ha estudiat. Apart, la temperatura de ruptura és molt baixa ja que va des de 28°C a 32°C, per tant, no és suficientment alta per deformar el material i que les provetes fallin abans.

També s'ha aplicat la estadística de Taguchi per a veure quins factors influeixen al canvi de temperatura, encara que no se n'ha trobat cap perquè les temperatures no variaven suficient com per a treure una conclusió dels resultats finals. Per tant, la temperatura no s'observa com a un factor influent als assajos de fatiga per a *Timberfill*.

4.5 COMPARACIÓ DEL PLA AMB TIMBERFILL

Els resultats obtinguts per a Timberfill es poden comparar amb els resultats obtinguts al projecte i l'article escrit sobre el PLA [7, 16] ja que el Timberfill és un compost de PLA. I com bé diu el *Datasheet* del Timberfill, aquest material té unes propietats mecàniques similars a les del PLA.

Cal dir que les mostres són de les mateixes dimensions i el procediment per a obtenir els resultats en els dos casos d'estudi ha estat molt semblant.

4.5.1 Comparació dels paràmetres influents

La millor combinació amb els valors equivalents de cada una, dels dos materials, es mostren a la següent taula:

Taula 20. Resultats dels estudis de propietats mecàniques del PLA i *Timberfill*.

Material	Alçada de capa [mm]	Diàmetre de l'extrusor [mm]	Densitat d'emplenament [%]	Velocitat d'impressió [mm/min]
<i>Timberfill</i>	0.3	0.7	75	25
PLA	0.3	0.6	75	25

Es pot observar que, com mostra la taula 20, els valors són molt similars per els dos materials.

Els factors de densitat d'emplenament i la velocitat d'impressió adquireixen el mateix valor per els dos materials. Aquest resultat és lògic i coherent. Pel que fa la densitat d'emplenament, els dos materials tenen la màxima densitat en la que s'ha imprès. Aquest valor és coherent ja que, com més material té una proveta, més direccions de força té cobertes. Per tant, més difícil és que la proveta falli.

El valor que també comparteixen els dos materials és el de la velocitat d'impressió. Aquest valor, igual que la densitat d'emplenament, també és un valor lògic ja que és la velocitat d'impressió mínima aplicada als experiments. Com més lenta és aquesta velocitat, més precís

és el resultat imprès i amb més qualitat. Aquest fet permet que hi hagi menys errors a la proveta final i, per tant, que la peça no falli per un error de fabricació.

En quant a l'alçada de capa, el valor dels dos materials és el mateix. Encara que per PLA s'hagin agafat uns valors d'alçada de capa de (0.1, 0.2, 0.3) mm i per *Timberfill* (0.2, 0.3, 0.4) mm, el valor de 0.3 és el millor per a la millor combinació dels dos, aquest fet pot ser degut a la relació amb els diàmetres que s'ha comentat anteriorment. És important observar que els estudis de Taguchi mostren que per al PLA l'alçada de capa és més influent que el diàmetre de l'extrusor. En canvi, per *Timberfill* el factor més significatiu amb diferència és el diàmetre d'extrusió.

S'observa un canvi en el factor de diàmetre, on el *Timberfill* té un diàmetre de 0.7 i el PLA un diàmetre de 0.6. Encara que el diàmetre tingui valors diferents, s'ha d'apreciar que els dos materials tenen com a millor diàmetre el més gran que se'ls ha establert durant l'estudi. A l'estudi de PLA el valor de diàmetre va variar entre (0.4, 0.5, 0.6) mm. En canvi, per a *Timberfill* s'ha fet ús de diàmetres de (0.5, 0.6, 0.7) mm ja que, degut a les fibres de fusta que aquest disposa en la seva composició, imprimir amb el diàmetre 0.4 presentava problemes. És a dir, encara que semblin valors diferents, els dos materials tenen en comú que adquireixen el valor més gran de diàmetre que s'ha fet servir a l'estudi a fi de tenir les millors propietats mecàniques. Seria interessant fer un estudi sobre com repercuteix aplicar extrusors amb majors diàmetres, ja que s'hauria d'estudiar si seria millor, pels dos materials, un diàmetre més gran.

Es pot veure com un dels paràmetres més influents del PLA és la densitat d'emplenament, en canvi, aquesta no mostra gairebé influència estadística al *Timberfill*. Això pot ser degut al nombre de capes exteriors emprats a cada projecte. Per al *Timberfill* s'han utilitzat cinc capes exteriors i al PLA només una. Per això l'efecte d'emplenament interior és més baix al *Timberfill*.

4.5.2 Comparació corbes de Wöhler

Es pot veure que el límit de fatiga és més elevat per al PLA, és a dir, el polímer PLA té vida infinita per cicles de tensions menors a 45MPa, en canvi, el límit de fatiga de *Timberfill* és aproximadament de 20MPa.

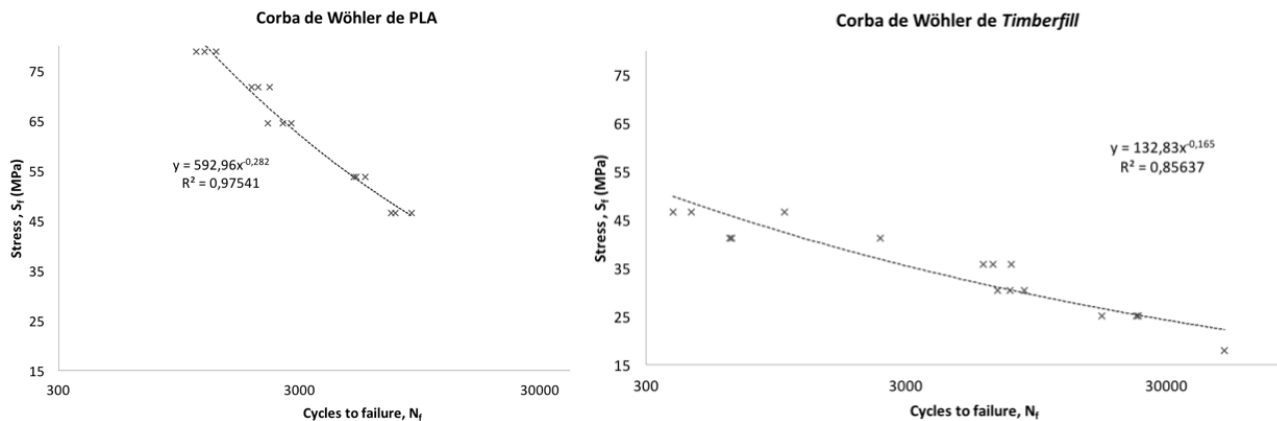


Figura 41. A l'esquerre la Corba de Wöhler de PLA, a la dreta la corba de Wöhler de *Timberfill*.

A fi de veure com afecte un canvi de la força d'assaig, que al gràfic s'observa en forma de tensió, al nombre de cicles de vida a cada material, es suposa un increment de 5MPa a cada gràfic de cada polímer. Gràficament (figura 42) s'observa com l'increment de 5MPa al PLA mostra una certa variació de cicles, en canvi, el mateix increment per a *Timberfill* mostra una variació de cicles molt més gran.

Com que les dues corbes tenen una pendent suficientment constant, es pot arribar a la proporcionalitat de l'afecte de cicles entre un material i l'altre. És a dir, amb una variació de 5MPa, el nombre de cicles de vida per a *Timberfill* és 3,5 vegades més gran que els del PLA.

Per tant, incrementar la tensió aplicada 5MPa implica que $N_f(\text{Timberfill}) = 3,5 \cdot N_f(\text{PLA})$

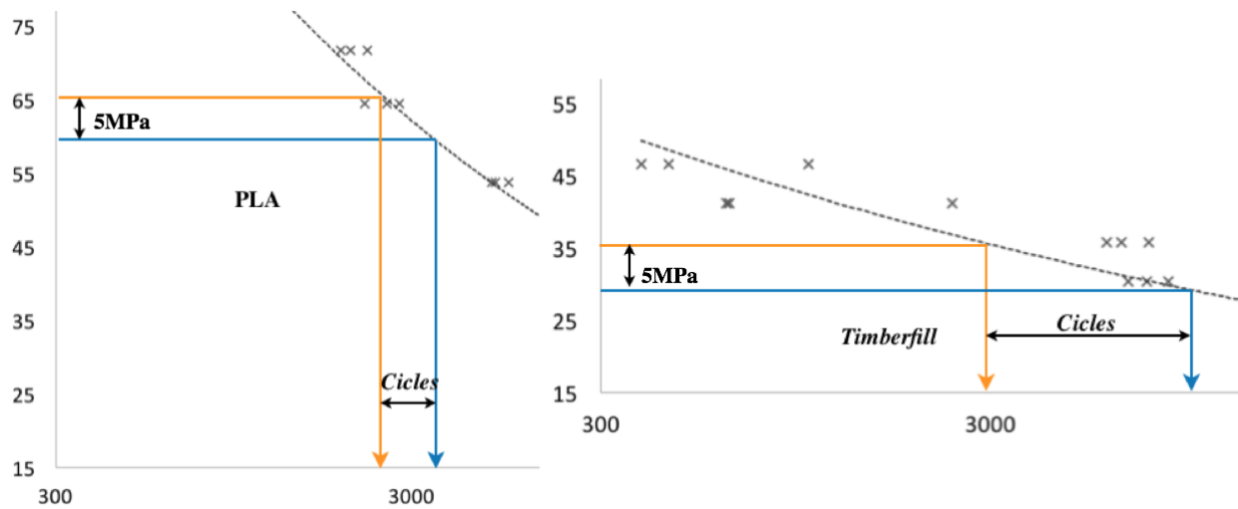


Figura 42. Representació de com afecta l'increment de 5N als cicles de vida de cada material.

Es pot concloure que el *Timberfill* té un pitjor comportament a fatiga que el PLA i això pot ser degut a les fibres de fusta que diferencien un polímer de l'altre.

Que el *Timberfill* sigui un compost i no un polímer, implica que hi hagi més discontinuïtats causades per les fibres de fusta i això fa que els cicles de vida disminueixin. El PLA, al ser un polímer, és més dúctil i per tant, l'esquerda a l'hora de rompre no es propaga tant ràpid com ho fa al *Timberfill*. Aquesta ductilitat que falta al *Timberfill* provoca que sigui un material amb les propietats mecàniques més baixes que el PLA ja que no admet tanta deformació abans de rompre.

4.5.3 Comparació de les temperatures de ruptura

El PLA i el *Timberfill* comparteixen l'efecte de les temperatures sobre els resultats. Tant per un material com per l'altre s'observen unes temperatures de ruptura constants. Aquest fet demostra que la composició dels polímers no fan que la temperatura variï. Si que es veu que les temperatures de ruptura del PLA són més altes que les del *Timberfill*, però són constants pels dos materials.

5. CONCLUSIONS

Una vegada s'ha finalitzat l'estudi s'han arribat a varies conclusions dels resultats.

S'han estudiat els efectes sobre les propietats mecàniques de la velocitat d'impressió, el diàmetre de l'extrusor, la densitat d'emplenament i l'alçada de capa, mantenint sempre constant l'orientació d'impressió respecte l'eix X i el patró d'emplenament amb *Honeycomb*. S'ha observat que la influència del diàmetre de l'extrusor és molt major sobre la influència dels altres paràmetres. Aquest fet no permet observar correctament la influència que tenen els altres factors.

La combinació de paràmetres més òptima és la següent:

- Alçada de capa = 0.3 mm
- Diàmetre de l'extrusor = 0.7 mm
- Densitat d'emplenament = 75%
- Velocitat d'impressió = 25 mm/min

Aquesta combinació de paràmetres mostra la vida més òptima de les provetes, és a dir, aquesta combinació ha mostrat els millors resultats de l'estudi d'aquest projecte. Les provetes tenen una vida infinita per a tensions menors de 20MPa.

Per a cada combinació realitzada s'ha calculat el cost de producció i d'execució de l'experiment. Els costs entre provetes no varia molt. S'observa que el cost de la proveta amb millor combinació no és el major, per tant, no és cert que com més alt és el cost d'una de les mostres, millor sigui el seu resultat. Hi ha una relació directe amb la quantitat de material utilitzat i el cost, quan incrementa un, incrementa l'altre. Entre tots els costs que s'han tingut en compte, el material és el que té més influència sobre el cost final, encara que no s'han tingut en compte els costs de treballadors que realitzen el projecte.

També s'ha estudiat la temperatura de ruptura. De la temperatura de n'han tret dues conclusions. La primera és que aquesta temperatura s'ha assumit constant per a tots als assajos. La segona conclusió és que la temperatura és baixa (oscil·la entre 28 i 32 °C), per tant, no afecta a la ruptura de les mostres ja que no és suficientment alta com per deformar les provetes durant l'assaig.

A partir de tots els resultats es podrien canviar alguns paràmetres del *Datasheet*. Per exemple, el fabricant recomana l'ús de diàmetre com a mínim a 0.4 mm, però durant el projecte s'ha trobat que 0.4 mm és diàmetre massa petit per aquest material.

Aquest projecte ha ajudat a descobrir comportaments del *Timberfill*, que encara està en procés d'estudi. El treball ha guiat a un estudi del comportament mecànic d'aquest material passant per la fabricació de les mostres. S'han observat problemes a l'hora d'imprimir el material que s'han reflectit a les seves propietats mecàniques. Tots els resultats d'aquest projecte poden servir com a punt de partida d'altres futurs projectes relacionats amb l'estudi de propietats mecàniques de peces fabricades per impressió 3D amb *Timberfill*.



6. BIBLIOGRAFIA

6.1 REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- [1] Belter JT, Dollar AM. Strengthening of 3D Printed Fused Deposition Manufactured Parts Using the Fill Compositing Technique. Pugno N, editor. PLoS One [Internet]. Public Library of Science; 2015 Apr 16 [cited 2018 May 31];10(4):e0122915. Available from: <http://dx.plos.org/10.1371/journal.pone.0122915>
- [2] Camps MC. MANUFACTURING PARAMETERS CHARACTERISATION OF 3D PRINTER. Universitat Politècnica de Catalunya - UPC; 2017.
- [3] Es-Said OS, Foyos J, Noorani R, Mendelson M, Marloth R, Pregger BA. Effect of Layer Orientation on Mechanical Properties of Rapid Prototyped Samples. Mater Manuf Process [Internet]. Taylor & Francis Group ; 2000 Jan [cited 2018 May 31];15(1):107–22. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426910008912976>
- [4] Fernandez-Vicente M, Calle W, Ferrandiz S, Conejero A. Effect of Infill Parameters on Tensile Mechanical Behavior in Desktop 3D Printing. 3D Print Addit Manuf [Internet]. 2016;3(3):183–92. Available from: <http://online.liebertpub.com/doi/10.1089/3dp.2015.0036>
- [5] Forster AM. Materials Testing Standards for Additive Manufacturing of Polymer Materials: State of the Art and Standards Applicability. NIST [Internet]. 2015;1–45. Available from: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/ir/2015/NIST.IR.8059.pdf>
- [6] Gibson I, Rosen D, Stucker B. Additive Manufacturing Technologies [Internet]. Second Edi. Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing, Second Edition. Louisville: Springer; 2015. 1-498 p. Available from: www.springer.com
- [7] Gomez-Gras G, Jerez-Mesa R, Travieso-Rodriguez JA, Lluma-Fuentes J. Fatigue performance of fused filament fabrication PLA specimens. Mater Des [Internet]. Elsevier Ltd; 2018;140:278–85. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2017.11.072>
- [8] Gurralla PK, Regalla SP. Part strength evolution with bonding between filaments in fused deposition modelling. Virtual Phys Prototyp [Internet]. Taylor & Francis; 2014 [cited 2018 Apr 2];9(3):141–9. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2014.913400>
- [9] Jerez-Mesa R, Travieso-Rodriguez JA, Gomez-Gras G. Precisión dimensional de impresoras 3D: Estudio Comparativo a través de mediciones de alta precisión. 2017;23–

6.

- [10] Leunda J. Componentes metálicos LMD y EBAM. EUSK-ADDI; 2015.
- [11] Lewinsohn CA. Mechanical Behavior of Materials by Norman E. Dowling. Mater Manuf Process [Internet]. Taylor & Francis Group; 2000 Aug [cited 2018 May 4];15(5):775–6. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10426910008913020>
- [12] Optfain E. Análisis cualitativo del impacto de la Impresión 3D en la industria y la economía. Informe cero. 1. Available from: <http://optfain.com/>
- [13] Optfain E. Anáñosos cualitativo del imacto de la Impresión 3D en el sector médico y la reindustrialización. Informe uno. 2. Available from: <http://optfain.com/>
- [14] Ortiz P. Fatiga rotativa. In: Disseny de Màquines Universitat Politècnica de Catalunya. 2017.
- [15] Pham DT, Gault RS. A comparison of rapid prototyping technologies. 1998;38:1257–87.
- [16] Puig D. Resistencia mecánica de piezas fabricadas mediante FDM. Universitat Politècnica de Catalunya - UPC; 2016.
- [17] Sames WJ, List FA, Pannala S, Dehoff RR, Babu SS. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. Int Mater Rev. 2016;61(5): 315–60.
- [18] Travieso-Rodriguez JA. Impressió 3D. In: Fabricació Universitat Politècnica de Catalunya. 2017.
- [19] Wong K, V. U, Hernandez A. A Review of Additive Manufacturing. ISRN Mech Eng [Internet]. 2012;1–10. Available from: <http://www.hindawi.com/journals/isrn/2012/208760/>
- [20] Slic3r Manual - Infill Patterns and Density [Internet]. [cited 2018 Mar 8]. Available from: <http://manual.slic3r.org/expert-mode/infill>
- [21] Timberfill Champagne – Fillamentum [Internet]. [cited 2018 Feb 5]. Available from: <https://fillamentum.com/collections/timberfill/products/timberfill-champagne?variant=1261597627>
- [22] Additive Manufacturing Research Group | Loughborough University [Internet]. [cited 2018 Feb 28]. Available from: <http://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/whatisam/>
- [23] Gunt Hamburg - Equipment for Engineering Education [Internet]. [cited 2018 Mar 12]. Available from: <https://www.gunt.de/en/products/engineering-mechanics-and-engineering-design/testing-of-materials/fatigue-of-materials/fatigue-strength-test/020.14000/wp140/glct-1:pa-148:ca-37:pr-1537?scsf=1>
- [24] 3D Printing| Simplify3D [Internet]. [cited 2018 May 31]. Available from: <https://www.simplify3d.com/support/>

6.2 BIBLIOGRAFIA DE CONSULTA

- [25] Ahn S, Montero M, Odell D, Roundy S, Wright PK. Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyp J* [Internet]. 2002;8(4):248–57. Available from: <http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/13552540210441166>
- [26] Chen NNS, Niem PIF, Lee RC. Fatigue Behaviour of Adhesive Bonded Joints. *J Adhes* [Internet]. Taylor & Francis Group; 1987 [cited 2018 Apr 26];21(2):115–28. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00218468708074962>
- [27] González JO. Study of manufacturing of parameters in pieces obtained by FDM. UPC; 2016.
- [28] Gurralla PK, Regalla SP. Multi-objective optimisation of strength and volumetric shrinkage of FDM parts. *Virtual Phys Prototyp* [Internet]. 2014 [cited 2018 May 28];9(2):127–38. Available from: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/17452759.2014.898851>
- [29] Jerez-Mesa R, Gomez-Gras G, Travieso-Rodriguez JA, Garcia-Plana V. A comparative study of the thermal behavior of three different 3D printer liquefiers. *Mechatronics*. Elsevier Ltd; 2017;0:1–9.
- [30] Martí-Rodríguez B. Estudio sobre la optimización de los parámetros de fabricación en una impresora 3D con tecnología FDM. Universitat Politècnica de Catalunya - UPC; 2017.

ANNEXES

ANNEXES - ESTUDI DE PROPIETATS MECÀNIQUES DE PECES FABRICADES PER IMPRESSIÓ 3D

Factor	A	B	AxB	AxB	C	AxC	AxC	BxC	D	e	BxC	e	e
Columna	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	3	3	3	3
4	1	2	2	2	1	1	1	2	2	2	3	3	3
5	1	2	2	2	2	2	2	3	3	3	1	1	1
6	1	2	2	2	3	3	3	1	1	1	2	2	2
7	1	3	3	3	1	1	1	3	3	3	2	2	2
8	1	3	3	3	2	2	2	1	1	1	3	3	3
9	1	3	3	3	3	3	3	2	2	2	1	1	1
10	2	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
11	2	1	2	3	2	3	1	2	3	1	2	3	1
12	2	1	2	3	3	1	2	3	1	2	3	1	2
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	1	3	1	2
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	2	1	2	3
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	3	2	3	1
16	2	3	1	2	1	2	3	3	1	2	2	3	1
17	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3	3	1	2
18	2	3	1	2	3	1	2	2	3	1	1	2	3
19	3	1	3	2	1	3	2	1	3	2	1	3	2
20	3	1	3	2	2	1	3	2	1	3	2	1	3
21	3	1	3	2	3	2	1	3	2	1	3	2	1
22	3	2	1	3	1	3	2	2	1	3	3	2	1
23	3	2	1	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2
24	3	2	1	3	3	2	1	1	3	2	2	1	3
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	1	2	1	3
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	2	3	2	1
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	3	1	3	2

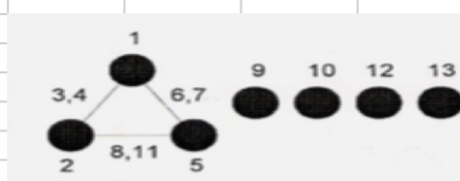


Figura A1. Taula general de Taguchi.

Factores	Assignación	Nivell			Unidades	Columna
		1	2	3		
Altura_Capa	A	0.2	0.3	0.4	mm	1
Diametro_Boquilla	B	0.5	0.6	0.7	mm	2
Ancho_hilo						
Fill_Density	C	25	50	75	%	5
Velocidad	D	25	30	35	mm/min	9

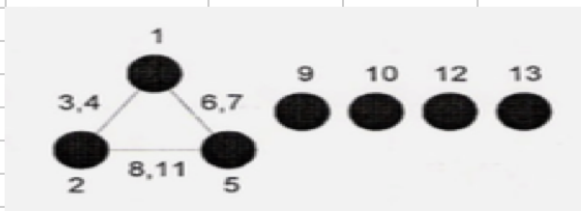


Figura A2. Taula de paràmetres utilitzats a Taguchi.

Factor	A	B	C	D		Diametro_B oquilla		
Columna	1	2	5	9	Altura_Capa	Ancho_hilo	Fill_Density	Velocidad
1	1	1	1	1	0.2	0.7	25	25
2	1	1	2	2	0.2	0.7	50	30
3	1	1	3	3	0.2	0.7	75	35
4	1	2	1	2	0.2	0.5	25	35
5	1	2	2	3	0.2	0.5	50	30
6	1	2	3	1	0.2	0.5	75	25
7	1	3	1	3	0.2	0.6	25	35
8	1	3	2	1	0.2	0.6	50	25
9	1	3	3	2	0.2	0.6	75	30
10	2	1	1	2	0.3	0.7	25	30
11	2	1	2	3	0.3	0.7	50	35
12	2	1	3	1	0.3	0.7	75	25
13	2	2	1	3	0.3	0.5	25	35
14	2	2	2	1	0.3	0.5	50	25
15	2	2	3	2	0.3	0.5	75	30
16	2	3	1	1	0.3	0.6	25	25
17	2	3	2	2	0.3	0.6	50	30
18	2	3	3	3	0.3	0.6	75	35
19	3	1	1	3	0.4	0.7	25	35
20	3	1	2	1	0.4	0.7	50	25
21	3	1	3	2	0.4	0.7	75	30
22	3	2	1	1	0.4	0.5	25	25
23	3	2	2	2	0.4	0.5	50	30
24	3	2	3	3	0.4	0.5	75	35
25	3	3	1	2	0.4	0.6	25	30
26	3	3	2	3	0.4	0.6	50	35
27	3	3	3	1	0.4	0.6	75	25

Figura A3. Taula de Taguchi.

#	AVG	TEMP	TEMPS (min)	LONGITUD (mm)	PES MAT PROGRAMA(g)	COST PREVIST
1	1580,4	28,54	46	1510,6	11,95	0,55
2	4819,4	30,76	39	153101	12,11	0,56
3	1648,0	31,9	34	1542,6	12,2	0,56
4	919,3		41	1371,3	10,85	0,5
5	428,2		49	1433,2	11,34	0,52
6	716,6		60	1473,4	11,66	0,54
7	654,0		38	1479,9	11,71	0,54
8	913,3		53	1499,2	11,86	0,55
9	1432,3		45	1524,3	12,06	0,55
10	1751,4	29,86	26	1512,2	11,96	0,55
11	4897,4	31,58	23	1532,9	12,13	0,56
12	6456,3	32,25	31	1544,4	12,22	0,56
13	698,8		28	1376,2	10,89	0,5
14	387,2		39	1433,6	11,34	0,52
15	2467,2		34	1474,7	11,67	0,54
16	935,4		35	1476	11,68	0,54
17	746,2		30	1493,5	11,81	0,54
18	1342,6		26	1516,9	12	0,55
19	2518,2	31,66	17	1524,7	12,06	0,55
20	1327,2	31,82	24	1544	12,21	0,56
21	2067,2	31,32	20	1553,8	12,29	0,57
22	1103,0		30	1420,6	11,24	0,52
23	1427,2		26	1470	11,63	0,53
24	582,0		22	1492,8	11,81	0,54
25	1518,5		23	1501,2	11,87	0,55
26	1054,0		20	1516,5	12	0,55
27	1646,0		27	1534,1	12,14	0,56

Figura A4. Taula utilitzada per representar les gràfiques estudiades.

#	AVG	Diàmetre extrusor
1	1580,4	0,70
2	4819,4	0,70
3	1648,0	0,70
4	919,3	0,50
5	428,2	0,50
6	716,6	0,50
7	654,0	0,60
8	913,3	0,60
9	1432,3	0,60
10	1751,4	0,70
11	4897,4	0,70
12	6456,3	0,70
13	698,8	0,50
14	387,2	0,50
15	2467,2	0,50
16	935,4	0,60
17	746,2	0,60
18	1342,6	0,60
19	2518,2	0,70
20	1327,2	0,70
21	2067,2	0,70
22	1103,0	0,50
23	1427,2	0,50
24	582,0	0,50
25	1518,5	0,60
26	1054,0	0,60
27	1646,0	0,60

Figura A5. Taula utilitzada per representar la gràfica comparant l'efecte dels diàmetres.

#	temps (min)	velocitat rotació (rpm)	núm cicles calculats	núm cicles màq
1	0,1265	2800	354,2	358
1	1,15416667	2800	3231,666667	3403
1	0,20316667	2800	568,8666667	593
1	0,63966667	2800	1791,066667	1871
1	0,5725	2800	1603	1677
2	1,32883333	2800	3720,733333	3916
2	1,75	2800	4900	4900
2	1,93183333	2800	5409,133333	5731
2	1,591	2800	4454,8	4722
2	1,6345	2800	4576,6	4828
3	1,48016667	2800	4144,466667	4391
3	0,1755	2800	491,4	505
3	0,48233333	2800	1350,533333	1417
3	0,224	2800	627,2	648
3	0,43433333	2800	1216,133333	1279
4	0,2	2800	560	598
4	0,21666667	2800	606,666667	637
4	0,51666667	2800	1446,666667	1523
4	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0,14783333	2800	413,9333333	425
5	0,13016667	2800	364,4666667	367
5	0,20316667	2800	568,8666667	587
5	0,2	2800	560	540
5	0,09066667	2800	253,8666667	222
6	0,14933333	2800	418,1333333	429
6	0,17766667	2800	497,4666667	516
6	0,265	2800	742	775
6	0,20883333	2800	584,7333333	607
6	0,42716667	2800	1196,066667	1256
7	0,41666667	2800	1166,666667	1252
7	0,15	2800	420	437
7	0,08333333	2800	233,3333333	273
7	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0,25	2800	700	700
8	0,53333333	2800	1493,333333	1597
8	0,23333333	2800	653,3333333	698
8	0,23333333	2800	653,3333333	658
8	0	0	0	0

Figura A6. Dades obtingudes als assajos de fatiga (1)

9	0,5	2800	1400	1400
9	0,55	2800	1540	1555
9	0,46666667	2800	1306,666667	1342
9	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0,24166667	2800	676,666667	703
10	0,30066667	2800	841,866667	880
10	0,57866667	2800	1620,266667	1707
10	0,80266667	2800	2247,466667	2360
10	1,05416667	2800	2951,666667	3107
11	0,94116667	2800	2635,266667	3218
11	0,9	2800	2520	2664
11	1,29633333	2800	3629,733332	3842
11	3,01366667	2800	8438,266668	8921
11	1,96716667	2800	5508,066668	5842
12	2,625	2800	7350	7807
12	1,7245	2800	4828,6	5119
12	1,5235	2800	4265,8	4507
12	0,74833333	2800	2095,333333	2185
12	2,0965	2800	5870,2	6207
13	0,19116667	2800	535,266667	548
13	0,198	2800	554,4	576
13	0,161	2800	450,8	465
13	0,28433333	2800	796,133333	833
13	0,364	2800	1019,2	1072
14	0,05266667	2800	147,466667	142
14	0,08183333	2800	229,133333	231
14	0,1975	2800	553	574
14	0,27916667	2800	781,666667	802
14	0,06733333	2800	188,533333	187
15	2,11666667	2800	5926,666667	5926,666667
15	0,27333333	2800	765,333333	797
15	0,38283333	2800	1071,933333	1172
15	0,61666667	2800	1726,666667	1973
15	0	0	0	0
16	0,27866667	2800	780,266667	814
16	0,48333333	2800	1353,333333	1390
16	0,24533333	2800	686,933333	712
16	0,30783333	2800	861,933333	900
16	0,29416667	2800	823,666667	861

Figura A7. Dades obtingudes als assajos de fatiga (2)

17	0,3855	2800	1079,4	1132
17	0,236	2800	660,8	689
17	0,1385	2800	387,8	349
17	0,37166667	2800	1040,666667	1051
17	0,176	2800	492,8	510
18	0,23333333	2800	653,333333	675
18	0,238	2800	666,4	695
18	0,363	2800	1016,4	1065
18	0,5255	2800	1471,4	1551
18	0,92133333	2800	2579,733333	2727
19	0,47966667	2800	1343,066667	1404
19	0,61716667	2800	1728,066667	1824
19	1,111	2800	3110,8	3288
19	1,41916667	2800	3973,666667	4211
19	0,67533333	2800	1890,933333	1864
20	0,513	2800	1436,4	1442
20	0,74283333	2800	2079,933333	2197
20	0,18816667	2800	526,866667	546
20	0,3975	2800	1113	1165
20	0,463	2800	1296,4	1289
21	0,7645	2800	2140,6	2263
21	0,83116667	2800	2327,266667	2461
21	0,91616667	2800	2565,266667	2690
21	0,36883333	2800	1032,733333	1032,733333
21	0,64066667	2800	1793,866667	1889
22	0,349	2800	977,2	1022
22	0,39233333	2800	1098,533333	1114
22	0,55983333	2800	1567,533333	1636
22	0,43333333	2800	1213,333333	1262
22	0,16666667	2800	466,666667	481
23	0,524	2800	1467,2	1544
23	0,45833333	2800	1283,333333	1284
23	0,4995	2800	1398,6	1472
23	0,641	2800	1794,8	1894
23	0,32183333	2800	901,133333	942
24	0,0855	2800	239,4	239
24	0,23083333	2800	646,333333	619
24	0,30366667	2800	850,266667	888
24	0	0	0	0
24	0	0	0	0

Figura A8. Dades obtingudes als assajos de fatiga (3)

25	0,336	2800	940,8	985
25	0,26133333	2800	731,7333333	762
25	0,97716667	2800	2736,066667	2881
25	0,49166667	2800	1376,666667	1446
25	0	0	0	0
26	0,38666667	2800	1082,666667	1069
26	0,4415	2800	1236,2	1288
26	0,47766667	2800	1337,466667	1196
26	0,14533333	2800	406,9333333	400
26	0,44633333	2800	1249,733333	1317
27	0,2745	2800	768,6	797
27	0,51	2800	1428	1478
27	0,77933333	2800	2182,133333	2294
27	0,86466667	2800	2421,066667	2545
27	0,36983333	2800	1035,533333	1116

Figura A9. Dades obtingudes als assajos de fatiga (4)

	AVG CALC	AVG MÀQ	ERROR
1	1509,76	1580,4	-4,678889
2	4612,2533	4819,4	-4,491225
3	1565,9467	1648	-5,239855
4	871,11111	919,33333	-5,535714
5	432,22667	428,2	0,93161
6	687,68	716,6	-4,205444
7	606,66667	654	-7,802198
8	875	913,25	-4,371429
9	1415,5556	1432,3333	-1,185243
10	1667,5867	1751,4	-5,026026
11	4546,2667	4897,4	-7,723553
12	4881,9867	6456,25	-32,24637
13	671,16	698,8	-4,118243
14	379,96	387,2	-1,905464
15	2372,65	2467,1667	-3,983591
16	901,22667	935,4	-3,791869
17	732,29333	746,2	-1,899057
18	1277,4533	1342,6	-5,09973
19	2409,3067	2518,2	-4,519696
20	1290,52	1327,8	-2,888758
21	1971,9467	2067,1467	-4,827717
22	1064,6533	1103	-3,601798
23	1369,0133	1427,2	-4,250263
24	578,66667	582	-0,576037
25	1446,3167	1518,5	-4,990839
26	1062,6	1054	0,8093356
27	1567,0667	1646	-5,037012

Figura A10. Error dels cicles donats per la màquina de fatiga respecte els errors calculats amb el temps.

[illegible]

Figura A11. Càlcul dels costos

	Cost mat	Cost impress	Cost fatiga				
	0,70505	0,0069991	0,570413				
	0,71449	0,0213435	0,4836111				
	0,7198	0,0072985	0,4216096				
	0,64015	0,0040714	0,5084116				
	0,66906	0,0018964	0,6076139				
	0,68794	0,0031736	0,744017				
	0,69089	0,0028964	0,4712108				
	0,69974	0,0040445	0,657215				
	0,71154	0,0063433	0,5580128				
	0,70564	0,0077564	0,3224074				
	0,71567	0,021689	0,2852065				
	0,72098	0,0285926	0,3844088				
	0,64251	0,0030948	0,3472079				
	0,66906	0,0017148	0,4836111				
	0,68853	0,0109263	0,4216096				
	0,68912	0,0041426	0,4340099				
	0,69679	0,0033047	0,3720085				
	0,708	0,0059459	0,3224074				
	0,71154	0,0111523	0,2108048				
	0,72039	0,0058775	0,2976068				
	0,72511	0,0091547	0,2480057				
	0,66316	0,0048848	0,3720085				
	0,68617	0,0063206	0,3224074				
	0,69679	0,0025775	0,2728062				
	0,70033	0,0067249	0,2852065				
	0,708	0,0046678	0,2480057				
	0,71626	0,0072896	0,3348077				
TOTAL	18,80271	0,2038834	10,986651				
				PERCENTATGE COSTOS			
				%	C1%	C2%	C3%
				100	62,689817	0,6797643	36,630419
				29,993244	18,80271	0,2038834	10,986651

Figura A12. Càlcul de la influència de cada tipus de cost.

AMB SUPORT			
TEMPS (min)	LONGITUD (mm)	PES MAT PROGRAMA(g)	COST PREVIST
46	1510,6	11,95	0,55
39	1531,01	12,11	0,56
34	1542,6	12,2	0,56
41	1371,3	10,85	0,5
49	1433,2	11,34	0,52
60	1473,4	11,66	0,54
38	1479,9	11,71	0,54
53	1499,2	11,86	0,55
45	1524,3	12,06	0,55
26	1512,2	11,96	0,55
23	1532,9	12,13	0,56
31	1544,4	12,22	0,56
28	1376,2	10,89	0,5
39	1433,6	11,34	0,52
34	1474,7	11,67	0,54
35	1476	11,68	0,54
30	1493,5	11,81	0,54
26	1516,9	12	0,55
17	1524,7	12,06	0,55
24	1544	12,21	0,56
20	1553,8	12,29	0,57
30	1420,6	11,24	0,52
26	1470	11,63	0,53
22	1492,8	11,81	0,54
23	1501,2	11,87	0,55
20	1516,5	12	0,55
27	1534,1	12,14	0,56

Figura A13. Variables de les mostres amb suport.

SENSE SUPORT			
TEMPS (min)	LONGITUD (mm)	PES MAT PROGRAMA(g)	COST PREVIST
42	1417,8	11,22	0,52
36	1438,2	11,38	0,52
32	1449,7	11,47	0,53
37	1261,4	9,98	0,46
44	1323,3	10,47	0,48
54	1363,5	10,79	0,5
34	1343	10,62	0,49
46	1362,3	10,78	0,5
40	1387,5	10,98	0,5
24	1418,1	11,22	0,52
21	1438,9	11,38	0,52
28	1450,3	11,47	0,53
25	1267,2	10,02	0,46
35	1324,6	10,48	0,48
30	1365,7	10,8	0,5
30	1345	10,64	0,49
26	1362,5	10,78	0,5
23	1385,9	10,96	0,5
16	1421,5	11,24	0,52
21	1440,9	11,4	0,52
18	1450,6	11,48	0,53
27	1314,6	10,4	0,48
23	1364	10,79	0,5
20	1386,8	10,97	0,5
20	1373,7	10,87	0,5
17	1389,1	10,99	0,51
24	1406,7	11,13	0,51

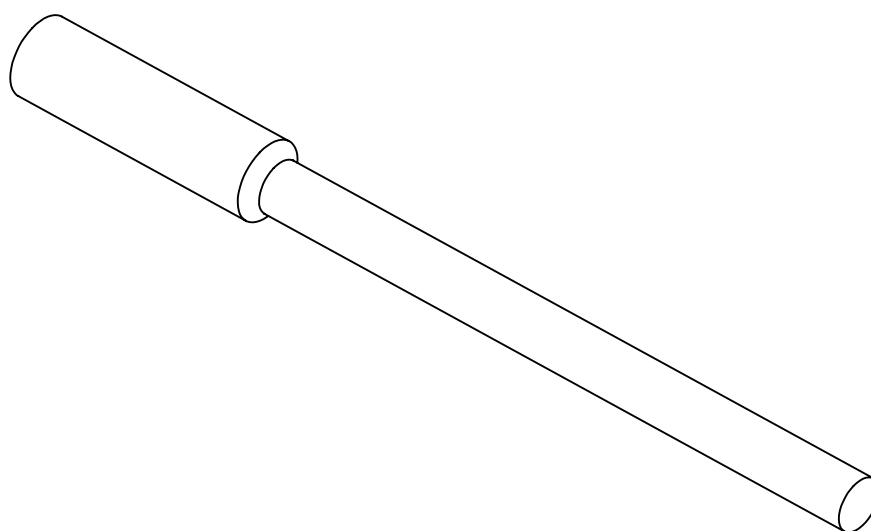
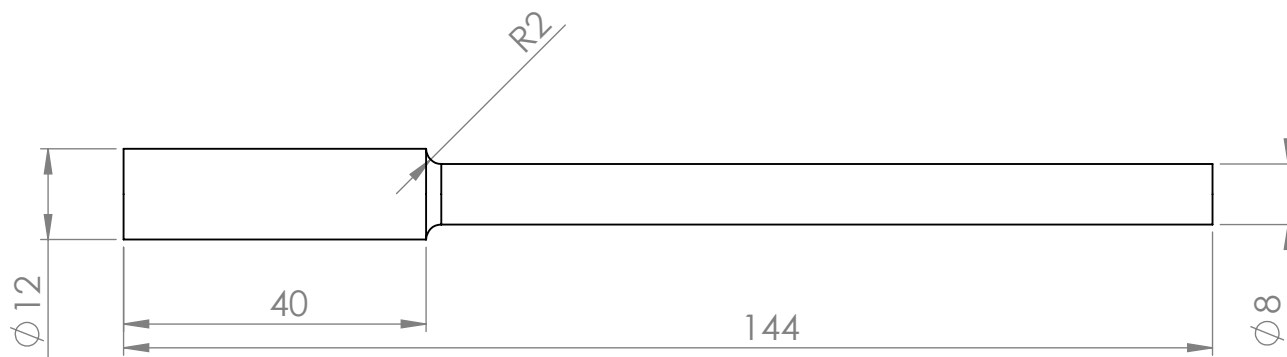
Figura A14. Variables de les mostres sense suport.

	SENSE SUPORT	ERROR PROGRAMA VS MANUAL
Pes suport	Material pesat (g)	Sense suport
0,7	9,26	17,47
0,7	9,62	15,47
0,7	9,5	17,18
0,9	9,65	3,31
0,9	9,31	11,08
0,9	10,42	3,43
1,1	9,5	10,55
1,1	9,97	7,51
1,1	10,22	6,92
0,7	9,63	14,17
0,8	9,8	13,88
0,8	9,97	13,08
0,9	9,44	5,79
0,9	9,58	8,59
0,9	10,22	5,37
1,0	9,32	12,41
1,0	9,63	10,67
1,0	10,12	7,66
0,8	9,82	12,63
0,8	9,98	12,46
0,8	10,03	12,63
0,8	9,8	5,77
0,8	10,11	6,30
0,8	9,72	11,39
1,0	9,84	9,48
1,0	9,84	10,46
1,0	10,03	9,88

Figura A15. Error dels resultats del programa respecte els resultats obtinguts.

Alçada capa	Diàmetre extrusor	Densitat emplenament	Velocitat	Cicles de vida	Relacions SN
0,20	0,70	25	25	1580,4	63,9753404
0,20	0,70	50	30	4819,4	73,6598595
0,20	0,70	75	35	1648,0	64,3391441
0,20	0,50	25	35	919,3	59,2694286
0,20	0,50	50	30	428,2	52,6329333
0,20	0,50	75	25	716,6	57,1055361
0,20	0,60	25	35	654,0	56,311555
0,20	0,60	50	25	913,3	59,2117936
0,20	0,60	75	30	1432,3	63,1208618
0,30	0,70	25	30	1751,4	64,8677069
0,30	0,70	50	35	4897,4	73,7993115
0,30	0,70	75	25	6456,3	76,1996068
0,30	0,50	25	35	698,8	56,8870579
0,30	0,50	50	25	387,2	51,758707
0,30	0,50	75	30	2467,2	67,8439709
0,30	0,60	25	25	935,4	59,4199473
0,30	0,60	50	30	746,2	57,4571049
0,30	0,60	75	35	1342,6	62,5589329
0,40	0,70	25	35	2518,2	68,0218044
0,40	0,70	50	25	1327,2	62,4584002
0,40	0,70	75	30	2067,2	66,3074398
0,40	0,50	25	25	1103,0	60,8515102
0,40	0,50	50	30	1427,2	63,0896967
0,40	0,50	75	35	582,0	55,2984597
0,40	0,60	25	30	1518,5	63,6282959
0,40	0,60	50	35	1054,0	60,4568122
0,40	0,60	75	25	1646,0	64,3285966

Figura A16. Taula utilitzada al Minitab



TFG - ESTUDI DE PROPIETATS MECÀNIQUES DE PECES FABRICADES PER IMPRESSIÓ 3D



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA
DE CATALUNYA**

	NOM	DATA	ESCOLA D'ENGINYERIA DE BARCELONA EST
DIBUIX	Bàrbara Adrover Monserrat	16/04/2018	Model mostres impreses per FDM
REVISAT	José Antonio Travieso	17/04/2018	
MATERIAL: Timberfill	ESCALA: 1:1		
PES: 11.47 g	Observacions: Aquest és el model d'una de les mostres impreses en el projecte a partir de la tècnica FDM. En total s'imprimiran 150 provetes de les mateixes dimensions. El pes és el pes de la millor proveta, la número 12.		
FORMAT: DIN-A4			